
CENTRALE
L Y O N

BIBLIOTHÈQUE

DE LA REVUE GÉNÉRALE DES SCIENCES

MESURE

DES

TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

MESURE

DES

TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

PAR

H. LE CHATELIER

Ingénieur en chef du Corps des Mines,
Professeur de Chimie minérale au Collège de France

ET

O. BOUDOUARD

Préparateur au Collège de France.



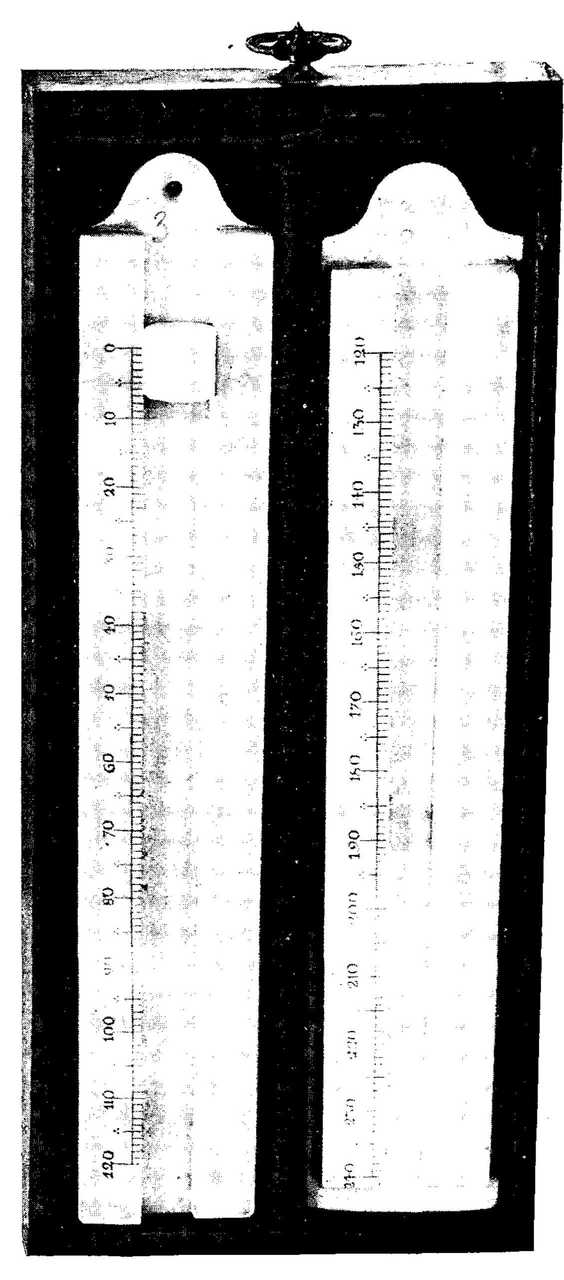
PARIS

GEORGES CARRÉ ET C. NAUD, ÉDITEURS

3, RUE RACINE, 3

1900

TABLE DES MATIÈRES



Pyromètre de Wedgwood.

MESURE

DES

TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

INTRODUCTION

Wedgwood, le célèbre potier du Staffordshire, l'inventeur de la faïence fine et du grès cérame, s'est le premier préoccupé de l'estimation précise des températures élevées. Dans une notice publiée en 1782, il développe, pour faire comprendre l'importance de cette question, des considérations dont, aujourd'hui encore, la méditation serait souvent profitable.

« La plupart des produits obtenus sous l'action du feu voient leur beauté et leur valeur considérablement dépréciées par les excès ou les défauts de chaleur les plus faibles ; souvent l'artiste ne peut tirer parti de ses expériences personnelles en raison de l'impossibilité de repérer le degré de chaleur qui a été obtenu sous ses yeux. A plus forte raison ne peut-il profiter des expériences d'autrui, parce que l'on peut encore moins communiquer l'idée imparfaite que chacun se fait de ces degrés de température. »

Joignant l'exemple au précepte, Wedgwood avait créé pour son usage personnel un pyromètre utilisant la contraction de l'argile. Cet instrument, pendant près d'un siècle, a été le seul guide dans les recherches

aux températures élevées. Remplacé aujourd'hui par des appareils d'un caractère plus scientifique, il est tombé dans un oubli peut-être exagéré.

Depuis Wedgwood, bien des savants se sont occupés de la mesure des températures élevées, mais avec un succès inégal. Trop indifférents aux choses pratiques, ils ont surtout envisagé le problème comme un prétexte à dissertations savantes. La nouveauté et l'originalité des méthodes les attiraient plus que la précision des résultats et la facilité des mesures. Aussi jusqu'à ces dernières années la confusion a-t-elle été en croissant. La température d'un four à acier variait suivant les observateurs de 1.500 à 2.000 ; celle du soleil de 1.500 à 1.000.000 de degrés.

Précisons tout d'abord la difficulté capitale du problème. La température n'est pas une grandeur mesurable au sens strict du mot. Mesurer une longueur, un poids, c'est compter combien de fois il faut juxtaposer un corps donné pris comme unité (*mètre*, *gramme*) pour réaliser un système complexe équivalent soit comme longueur, soit comme poids au corps étudié. La possibilité d'une semblable mesure suppose l'existence préalable de deux lois physiques : l'une d'*équivalence*, et l'autre d'*additivité*. La température obéit bien à la première de ces deux lois ; deux corps en équilibre de température avec un troisième et par suite équivalents par rapport aux échanges de chaleur vis-à-vis de ce troisième, seront encore équivalents, c'est-à-dire également en équilibre vis-à-vis de tout autre corps, qui serait isolément en équilibre avec l'un d'eux. Cette loi permet de repérer la température par comparaison avec un corps choisi arbitrairement comme corps thermométrique. Mais la seconde loi est en défaut; on ne peut, par la juxtaposition de plusieurs corps à la même température, réaliser un système équivalent, au point de vue des échanges de

chaleur, à un corps de température différente ; on ne mesure donc pas la température, au moins tant que l'on envisage seulement les phénomènes de convection.

Pour repérer une température on donne la mesure d'un phénomène quelconque variant avec la température. Par exemple, pour le thermomètre centigrade à mercure on définit la température par la *dilatation apparente du mercure*, comptée à partir de la température de *fusion de la glace* et mesurée au moyen d'une unité égale au 1/100 de la dilatation entre la température de *fusion de la glace et celle d'ébullition de l'eau* sous la pression atmosphérique.

Échelles thermométriques. — Pour un repérage semblable, il y a quatre données à choisir arbitrairement : le *phénomène* mesuré, le *corps* thermométrique, l'*origine* de la graduation et l'*unité* de mesure ; tandis que dans une mesure proprement dite il n'y a qu'une donnée arbitraire, la grandeur choisie comme unité. On comprend que le nombre des échelles thermométriques puisse être illimité ; trop souvent les expérimentateurs se sont fait un point d'honneur d'avoir chacun la leur.

Voici quelques exemples d'échelles thermométriques, choisis entre beaucoup d'autres :

AUTEURS.	PHÉNOMÈNE.	CORPS.	ORIGINE.	UNITÉ.	
Farenheit.	Dilatation.	Mercure.	Grand hiver.	1/180	Glace-vap.
Réaumur.	—	—	Glace.	1/80	—
Celsius.	—	—	—	1/100	—
Wedgwood.	Contract. perman.	Argile.	Déshydratat.	1/2400	des dimensions init.
Pouillet.	Dilat. à p. constant.	Air.	Glace.	1/100	Glace vap.
(Th. normal.)	Dilat. à v. constant.	Hydrogène.	—	—	—
(Ech. Ther. dyn.).	Ech. réver. de chaleur.	Quelconque.	Chaleur nulle.	—	—
Siemens.	Résistance électrique.	Platine.	Glace.	—	—

Les écarts énormes signalés précédemment dans les mesures des températures élevées résultent beaucoup plus de la diversité de ces échelles que d'erreurs dans les mesures proprement dites. Ainsi les expériences sur le rayonnement solaire qui ont conduit à des évaluations variant de 1 500 à 1 000 000 de degrés s'appuient sur des mesures ne différant pas entre elles de 25 p. 100.

Pour sortir de cette confusion il a fallu d'abord s'entendre sur une échelle unique des températures ; celle du thermomètre à gaz est universellement adoptée aujourd'hui et l'on peut considérer ce choix comme définitif. Les gaz possèdent plus qu'aucun autre état de la matière une qualité très importante pour un corps thermométrique : la possibilité d'être reproduits en tout temps et en tous lieux identiques à eux-mêmes ; en outre leur dilatation, qui définit l'échelle des températures, est assez considérable pour se prêter à des mesures très précises ; enfin cette échelle se confond pratiquement avec l'échelle thermodynamique. Cette dernière est en théorie préférable à toutes les autres parce qu'elle est indépendante de la nature des phénomènes et de celle des corps employés. Elle donne même une mesure véritable, et non pas un simple repérage ; son seul tort est d'être pour le moment expérimentalement irréalisable, rigoureusement au moins, et rien ne permet de prévoir qu'il doive bientôt cesser d'en être ainsi.

L'adoption de l'échelle du thermomètre à gaz n'implique en aucune façon l'obligation d'employer directement cet instrument dans toutes les mesures. On peut prendre n'importe quel thermomètre, pourvu que l'on ait au préalable repéré son échelle particulière en la comparant à celle du thermomètre à gaz. Suivant les cas on aura avantage à employer telle ou telle méthode ; pratiquement même on ne se sert jamais du thermomètre

à gaz en raison des difficultés inhérentes à son emploi, qui résultent principalement de ses grandes dimensions et de sa fragilité.

Nous nous proposons dans cette introduction de passer rapidement en revue les différentes méthodes pyrométriques (c'est-à-dire thermométriques utilisables aux températures élevées) dont l'emploi peut être avantageux dans telle ou telle circonstance, nous décrirons ensuite plus en détail chacune d'elles et nous discuterons les conditions de leur emploi. Mais avant tout il faut bien préciser dans quelles limites les différentes échelles peuvent être repérées par rapport à celle du thermomètre normal à gaz ; c'est l'insuffisance de ce repérage qui aujourd'hui encore est la cause des erreurs les plus importantes dans la mesure des températures élevées.

Points fixes. — Le repérage des différents pyromètres se fait le plus souvent à l'aide des points fixes de fusion et d'ébullition qui ont été une première fois déterminés au moyen du thermomètre à gaz ; la précision actuelle des mesures de température élevée est entièrement subordonnée à celle avec laquelle ces points fixes sont connus, cette précision n'est pas très grande parce que ces points fixes n'ont le plus souvent été comparés que d'une façon indirecte au thermomètre à gaz et quelques-uns d'entre eux ne l'ont même été qu'à l'aide de procédés d'extrapolation toujours très incertains.

M. Violle, le premier, a fait un ensemble d'expériences très précises qui jusqu'à ces dernières années faisaient seules loi sur la matière. Dans une première série de recherches il détermina la chaleur spécifique du platine par comparaison directe avec le thermomètre à air entre les températures de 500 et de 1 200°.

Et il se servit indirectement de la relation ainsi établie entre la chaleur spécifique et la température pour déterminer par comparaison avec le platine les points de fusion de l'or et de l'argent, puis par extrapolation de la même relation les points de fusion du palladium et du platine.

	Ag	Au	Pd	Pt
Fusion . .	954°	1 045°	1 500°	1 779°

Enfin dans une seconde série de recherches il détermina par comparaison directe avec le thermomètre à air le point d'ébullition du zinc.

	Zn
Ebullition	929,6

M. Barus, chimiste du Geological Survey des Etats-Unis, a déterminé le point d'ébullition de quelques métaux au moyen de couples thermo-électriques gradués avec le thermomètre à air.

	Cd	Zn
Ebullition	772 et 784°	926 et 931°
Moyenne. . . .	778	928,5

MM. Callendar et Griffiths au moyen d'un pyromètre à résistance de platine gradué jusqu'à 500° par comparaison avec le thermomètre à air ont déterminé les points de fusion et d'ébullition suivants :

	Sn	Bi	Cd	Pb	Zn
Fusion . .	232°	270°	322°	329°	421°
	Aniline.	Naphtaline.	Benzophénone.	Mercure.	Soufre.
Ebullition sous 760 mm.	184,1	217,8	305,8	356,7	444,5

Ces derniers nombres peuvent être rapprochés des

déterminations antérieures de Regnault et de M. Crafts.

Naphtaline.	Benzophénone.	Mercure.	Soufre.
218°	306°,1	357°	445°

MM. Heycock et Neville en employant la même méthode, mais avec extrapolation de la loi de résistance du platine établie jusqu'à 450 seulement, ont déterminé les points de fusion suivants :

Sn	Zn	Mg (à 99,5 p. 100)	Sb	Al (à 99 p. 100)	Ag	An	Cu
232	419	633	629,5	654,5	960,5	1 062	1 080,5

Enfin MM. Holborn et Wien au *Physikalische Reichanstalt* de Berlin ont fait récemment un ensemble de déterminations qui semblent, de toutes celles faites jusqu'ici, mériter le plus de confiance. Ils ont déterminé les points de fusion au moyen d'un couple thermo-électrique comparé jusqu'à 1 400° au thermomètre à air.

	Ag	Au	Pd	Pt
Fusion (Moyenne). .	970	1 072	1 580	1 780

M. Daniel Berthelot, dans des expériences toutes récentes, a gradué un couple thermo-électrique par comparaison avec le thermomètre à gaz en utilisant la loi de variation des indices de réfraction avec la densité. Et au moyen de ce couple, il a déterminé les points de fusion.

Ag	Au
962	1 064

De cet ensemble de données, on peut conclure que les points fixes offrant actuellement le plus de garan-

ties pour le repérage indirect des diverses échelles thermométriques sont les suivants :

	Sn	Naphtaline	Zn	S	Sb	Al	Zn	Ag	Au	Pt
Fusion . .	232	»	420	»	630	655	»	962	1 065	1 780
Ebullition.	»	218	»	445	»	»	930	»	»	»

Ces températures peuvent être considérées comme connues avec une incertitude inférieure à :

Entre 200 et 500°.	1°
— 500 et 800°.	5°
— 800 et 1 100°.	10°
Au-dessus de 1 100°.	50°

Malgré la concordance des deux déterminations du point de fusion de platine, on doit conserver quelques doutes au sujet de la précision du nombre obtenu ; il résulte dans les deux cas d'extrapolations très lointaines dont la concordance peut être fortuite.

Pyromètres. — Parmi les nombreuses méthodes pyrométriques proposées, nous ne retiendrons que les suivantes, les seules qui aient jusqu'ici fait leurs preuves.

Pyromètre à gaz (Pouillet, Becquerel, Sainte-Claire-Deville). — Utilise la mesure du changement de pression d'une masse gazeuse maintenue à volume constant. Son grand volume et sa fragilité le rendent impropre aux mesures courantes ; il ne sert qu'à donner la définition de la température et doit être employé pour le repérage des autres pyromètres.

Pyromètre calorimétrique (Regnault, Violle, Le Chatelier). — Utilise la chaleur d'échauffement des métaux. (Le platine dans les laboratoires, le nickel dans les usines.) Est recommandable pour les recherches intermittentes dans les usines parce que son emploi ne

demande presque aucun apprentissage et que les frais de première installation sont très peu élevés.

Pyromètre à radiation (Rosetti, Langley, du Boys). — Utilise la chaleur totale rayonnée par les corps chauds. Ses indications sont influencées par le pouvoir émissif variable des différents corps. Convient pour l'évaluation des températures très élevées auxquelles ne peut résister aucun corps thermométrique (arc électrique, soleil).

Pyromètre optique (Becquerel, Le Chatelier). — Utilise la mesure photométrique d'une radiation de longueur d'onde donnée de la partie visible du spectre. Ses indications, comme dans la méthode précédente. sont influencées par les variations du pouvoir émissif. L'intervention de l'œil facilite beaucoup les observations, mais diminue notablement leur précision. Cette méthode est surtout employée dans les usines pour l'évaluation de la température des corps difficilement accessibles, par exemple des corps en mouvement. (Coulée d'un métal en fusion, métal chaud passant au laminoir.)

Pyromètre à résistance électrique (Siemens, Callendar). — Utilise les variations de résistance électrique des métaux (platine) avec la température. Cette méthode comporte des mesures très précises, mais exige l'emploi d'appareils fragiles et encombrants. Elle méritera la préférence pour les recherches de précision dans les laboratoires quand on aura un repérage satisfaisant des variations de résistance du platine par rapport aux indications du thermomètre normal à gaz.

Pyromètre thermo-électrique (Becquerel, Barus, Le Chatelier). — Utilise la mesure des forces électromotrices développées par la différence des tempéra-

tures de deux soudures thermo-électriques semblables opposées l'une à l'autre. En employant pour cette mesure un galvanomètre à cadre mobile Deprez d'Arsonval, on a un appareil très simple à manier et d'une précision largement suffisante dans l'état actuel des moyens de repérage dont on dispose par rapport à l'échelle normale de température. Ce pyromètre est aujourd'hui le plus généralement employé tant dans les laboratoires scientifiques que dans les usines.

Pyromètre à retrait (Wedgwood). — Utilise le retrait permanent que prennent les matières argileuses soumises à des températures plus ou moins élevées. N'est plus guère employé aujourd'hui que dans quelques fabriques de faïence.

Montres fusibles (Seger). — Utilise l'inégale fusibilité de pâtes céramiques de compositions variées. Ne donne que des indications discontinues ; les pâtes semblables étudiées par Seger sont espacées de façon à avoir des points de fusion distants d'environ 20° ; d'un emploi général en céramique et dans quelques industries similaires.

CHAPITRE PREMIER

ÉCHELLE NORMALE DES TEMPÉRATURES

Nous avons vu que la température n'est pas une grandeur mesurable ; elle est seulement repérable par rapport à une échelle choisie arbitrairement.

L'échelle normale est l'*échelle thermodynamique ;* mais comme il est impossible de réaliser en toute rigueur cette échelle, il est nécessaire d'avoir une échelle pratique. De même qu'à côté de la définition théorique du mètre, on a un étalon pratique, un certain mètre conservé au *Bureau International des Poids et Mesures*, il existe, à côté de l'échelle normale des températures, une échelle pratique qui est un certain thermomètre à gaz que nous allons étudier.

Lois de Mariotte et Gay-Lussac. — Les lois de Mariotte et de Gay-Lussac ont été le point de départ de l'idée d'employer la dilatation des gaz au repérage des températures. Ces deux lois peuvent s'écrire

$$\frac{p_1 v_1}{p_0 v_0} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_0} \qquad (1)$$

les températures étant mesurées au thermomètre à mercure. α est un coefficient numérique, le même pour tous

les gaz, au moins dans une première approximation et sa valeur est

$$\alpha = 0{,}00366 = \frac{1}{273}\cdot$$

quand on convient que l'intervalle entre les températures de la glace fondante et de l'eau bouillante est de 100°.

Mais au lieu de considérer la formule (1) comme l'expression d'une loi expérimentale rattachant le produit pv à la température définie par le thermomètre à mercure, on peut ne demander à l'expérience que la loi de Mariotte et poser *à priori* la formule en question ce qui donne une nouvelle définition de la température voisine de celle du thermomètre à mercure. Cette nouvelle échelle a l'avantage de se prêter à l'étude de températures beaucoup plus élevées. L'emploi de ce procédé préconisé par Pouillet a été définitivement étudié par Regnault.

L'expression des lois de Mariotte et de Gay-Lussac peut se mettre sous la forme

$$p\,v = n\,\mathrm{R}\left(\frac{1}{\alpha} + t\right) \qquad (2)$$

en appelant

n le nombre d'unités de quantité (cette unité pourra être soit le poids moléculaire, soit le gramme) ;

R la valeur de l'expression

$$\frac{p_0 v_0}{\frac{1}{\alpha} + t_0}$$

pour l'unité de quantité de matière prise à la température de la glace fondante et sous la pression atmosphérique.

Thermomètres à gaz. — Les expressions équivalentes (1) et (2), qui par convention donnent la définition de la température, peuvent, au point de vue expérimental, être utilisées de façons différentes pour la réalisation du thermomètre normal.

1° *Thermomètre à volume constant.* — Dans le thermomètre désigné sous ce nom on maintient invariable le volume et la masse.

L'expression (3) donne alors entre deux températures t et t_0 la relation :

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{\alpha} + t_0$$

d'où l'on tire

$$t - t_0 = p - p_0 \left(\frac{1}{\alpha} + t_0\right) \tag{3}$$

2° *Thermomètre à pression constante.* — Dans ce cas la pression et le volume de la masse échauffée restent constants, mais cette masse est variable ; une partie du gaz sort du réservoir. L'expression (2) donne alors

$$1 = \frac{n}{n_0} \cdot \frac{\frac{1}{\alpha} + t}{\frac{1}{\alpha} + t_0}$$

d'où

$$t - t_0 = \frac{n_0 - n}{n_0} \left(\frac{1}{\alpha} + t\right) \tag{4}$$

Il serait beaucoup plus logique d'employer au lieu des expressions consacrées thermomètre à pression ou à volume constant celles de *thermomètre à pression variable*, *thermomètre à masse variable*, qui définissent

beaucoup plus exactement le mode de fonctionnement envisagé.

3° *Thermomètre à pression et masse variable.* — Le fonctionnement de cet appareil participe à la fois de celui des deux précédents. Une partie du gaz sort du réservoir sans que la pression soit maintenue constante. L'expression (2) donne

$$\frac{p}{p_0} = \frac{n}{n_0} \frac{\frac{1}{\alpha} + t}{\frac{1}{\alpha} + t_0}$$

d'où

$$t - t_0 = \frac{pn_0 - p_0 n}{p_0 n} \left(\frac{1}{\alpha} + t_0\right) \qquad (3)$$

4° *Thermomètre voluménomètre.* — Il existe un quatrième mode d'emploi du thermomètre à gaz qui a été indiqué par Ed. Becquerel et présente, comme on le verra plus loin, un intérêt particulier pour l'évaluation des températures élevées. Nous lui gardons le nom que son auteur lui a donné. La détermination de la température est obtenue par deux mesures faites à la même température, et non plus comme dans les méthodes précédentes par deux mesures faites à deux températures différentes dont l'une est supposée connue. On fait varier la masse contenue dans le réservoir chauffé et on observe le changement de pression produit. L'expression (2) donne

$$pv = n\mathrm{R}\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$$

$$p'v = n'\mathrm{R}\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$$

d'où

$$(p - p')v = (n - n')\,\mathrm{R}\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$$

ou

$$t = -\frac{1}{\alpha} + \frac{p - p'}{n - n'} \cdot \frac{v}{R} \tag{6}$$

Ce qui exige la détermination préalable de la constante R.

Dans le cas particulier où l'on prendrait $p' = 0$, ce qui suppose que l'on fasse le vide, la relation précédente se simplifierait et deviendrait

$$t = -\frac{1}{\alpha} + \frac{p}{n} \cdot \frac{v}{R} \tag{7}$$

Les définitions de la température données par ces différents thermomètres seraient équivalentes entre elles et avec celle du thermomètre à mercure, si les lois de Mariotte et de Gay-Lussac étaient rigoureusement exactes, comme on l'avait cru tout d'abord. Le seul intérêt du thermomètre à gaz serait alors de prolonger aux températures élevées l'échelle du thermomètre à mercure. C'est dans ce but que l'ont employé Pouillet, Becquerel, Sainte-Claire Deville.

Expériences de Regnault. — Les expériences plus précises de Regnault sont venues modifier toutes les idées admises aussi bien sur le thermomètre à mercure que sur le thermomètre à gaz et ont conduit à l'adoption définitive d'un thermomètre normal à gaz.

Elles ont en premier lieu établi que les différents thermomètres à mercure ne sont pas comparables entre eux à cause de l'inégale dilatation des verres employés à leur construction. Ils ne peuvent donc pas donner une échelle invariable pour le repérage des températures. En les faisant accorder à 0° et 100°, ils ne présentent entre ces températures extrêmes que de

très faibles écarts, 0°,30 au maximum, mais aux températures supérieures à 100°, ces écarts peuvent devenir considérables, atteindre une dizaine de degrés.

THERMOMÈTRE à air à volume constant $p_0 = 760$.	THERMOMÈTRE A MERCURE EN			
	Cristal.	Verre blanc.	Verre vert.	Verre de Bohême.
100	+ 0,00	+ 0,00	+ 0,00	+ 0,00
150	+ 0,40	— 0,20	+ 0,30	+ 0,15
200	+ 1,25	— 0,30	+ 0,80	+ 0,50
250	+ 3,00	+ 0,05	+ 1,85	+ 1,44
300	+ 5,72	+ 1,08	+ 3,50	
350	+ 10,50	+ 4,00		

Les nombres figurant dans ce tableau indiquent les quantités dont il faut augmenter ou diminuer les températures données par le thermomètre à air pour avoir celles qui ont été observées avec les différents thermomètres à mercure.

Il était donc impossible de définir l'échelle pratique des températures par le thermomètre à mercure. L'emploi du thermomètre à gaz s'imposait. Mais Regnault reconnut qu'il n'était pas possible de prendre un *coefficient de dilatation* α *unique* indépendant de la *nature* du gaz, de sa *pression* et du *mode de dilatation* utilisé. Le coefficient de dilatation à volume constant (α) et le coefficient de dilatation à pression constante (β) ne sont pas identiques. Cela résulte de ce que la loi de Mariotte n'est pas rigoureusement exacte ; on a en réalité

$$pv = p_0 v_0 + \varepsilon$$

ε étant une quantité très petite, mais pas nulle.

Les expériences de Regnault lui ont permis, non seu-

lement de constater, mais de mesurer cette variation du coefficient de dilatation. Voici, par exemple, les résultats qu'il a trouvés pour l'air entre 0° et 100° :

VOLUME CONSTANT			PRESSION CONSTANTE		
Pression.	α	$\frac{1}{\alpha}$	Pression.	β	$\frac{1}{\beta}$
mm.			mm.		
266	0,003656	273,6	760	0,003671	272,4
760	3655	272,8	2 525	3694	270,7
1 692	3689	271	2 620	3696	270,4
3 655	3709	269,5			

Pour l'air à 4°5, Rankine donne, d'après les expériences de Regnault, la formule

$$pv = p_0v_0 + 0{,}008\,163\,\frac{p - p_0}{\varpi}\,.\,pv$$

ϖ étant la pression atmosphérique.

Ces coefficients varient en outre d'un gaz à l'autre, comme le montre le tableau suivant emprunté encore aux expériences de Regnault :

COEFFICIENT MOYEN ENTRE 0° ET 100°

VOLUME CONSTANT			PRESSION CONSTANTE		
Pression.	α	$\frac{1}{\alpha}$	Pression.	β	$\frac{1}{\beta}$
mm.			mm.		
			Air.		
760	0,003665	272,8	760	0,003671	272,4
3 655	3709	269,5	2 620	3696	270,4
			Hydrogène.		
760	3667	272,7	760	36613	273,1
			2 545	36616	273,2

VOLUME CONSTANT			PRESSION CONSTANTE		
Pression.	α	$\frac{1}{\alpha}$	Pression.	β	$\frac{1}{b}$
mm.			mm.		
		Oxyde de carbone.			
760	3667	272,7	760	3669	272,5
		Azote.			
760	3668	272,6	»	»	»
		Acide carbonique.			
760	3688	271,2	760	3710	269,5
3 589	3860	259	2 520	3845	259,5
		Acide sulfureux.			
760	3845	259,5	760	3902	253,0
			980	3980	251,3

Ces expériences montrent que les gaz facilement liquéfiables ont des coefficients tout à fait différents de ceux des gaz permanents.

Pour les gaz permanents, les coefficients à volume constant diffèrent bien moins entre eux que ceux à pression constante ; pour les premiers l'écart extrême n'atteint pas 1/1000, pour les seconds, il est trois fois plus grand. En laissant de côté l'air, qui est un mélange et qui renferme de l'oxygène plus facilement liquéfiable, les coefficients à volume constant de H^2,Az^2 et CO sont identiques.

Enfin, pour l'hydrogène, le coefficient de dilatation ne varie pas avec la pression.

L'inégalité des coefficients de dilatation n'empêche pas cependant que l'on puisse prendre indifféremment un gaz quelconque pour définir l'échelle des températures, à condition de lui appliquer son coefficient propre déterminé par une expérience entre 0° et 100°. Les

échelles seront identiques, si les coefficients de dilatation ne varient pas avec la température. C'est la conclusion à laquelle était arrivé Regnault en comparant des thermomètres à volume constant, différant par la pression initiale ou la nature du gaz. Voici les résultats obtenus, en partant des points fixes 0° et 100°, à l'aide des formules suivantes :

$$pv = n\,\mathrm{RT}$$
$$p_0 v = n\,\mathrm{RT}_0$$
$$p_{100} v = n\,\mathrm{RT}_{100}$$
$$\frac{p - p_0}{p_{100} - p_0} = \frac{\mathrm{T} - \mathrm{T}_0}{\mathrm{T}_{100} - \mathrm{T}_0} = \frac{t}{100}$$

THERMOMÈTRE A AIR	
$p_0 = 751$ mm.	$p_0 = 1486$ mm.
degrés.	degrés.
156,18	156,19
259,50	259,41
324,33	324,30

PRESSION = 760 MILLIMÈTRES			
Thermomètre à air.	Thermomètre à H.	Thermomètre à air.	Thermomètre à CO^2.
degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
141,75	141,91	159,78	160,0
228,87	228,88	267,35	267,45
325,40	325,21	322,8	322,9

Les écarts ne dépassent pas 0°2, grandeur que Regnault estimait ne pas dépasser les limites d'erreurs de ses expériences ; il en conclut que la nature du gaz était indifférente, et il prit l'air pour le thermomètre normal.

Cependant ses expériences sur l'acide sulfureux avaient montré une variation très notable du coefficient de dilatation de ce gaz avec la température. Le tableau donne le coefficient moyen à volume constant entre 0° et *t* :

t	α
98,0	0,0038251
102,45	38225
185,42	37999
257,17	37923
299,90	37913
310,31	37893

Par analogie, il est permis de conclure qu'un fait semblable doit avoir lieu pour les autres gaz ; mais les différences sont alors trop petites, et le degré de précision des méthodes de Regnault était insuffisant.

Le fait a été reconnu par les expériences de haute précision effectuées au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres. M. Chappuis a trouvé, entre 0° et 100°, des écarts systématiques entre les thermomètres à hydrogène, à azote et à acide carbonique, chargés à 0° sous la pression de 1.000 m. m. de mercure.

Th. à H	Th. à Az — Th. à H	Th. à Az — Th. à CO^2
degrés.	degrés.	degrés.
— 15	— 0,016	— 0,094
0	0	0
+ 25	+ 0,011	+ 0,050
+ 50	+ 0,009	+ 0,059
+ 75	+ 0,011	+ 0,038
+ 100	0	0

Dans ce tableau, en prenant pour la définition de la température le thermomètre à hydrogène à volume constant, les nombres des deux dernières colonnes

indiquent les écarts observés avec les thermomètres à azote et à acide carbonique ; il est certain que ces écarts sont systématiques. Ces résultats permettent de déterminer les coefficients moyens de dilatation :

t	α (hydrogène).	α (azote).	α (acide carbonique).
0°	»	0,00367698	0,00373538
100°	0,00366254	367466	372477

Les coefficients diminuent donc avec la température, tout en restant supérieurs à celui de l'hydrogène dont ils se rapprochent.

Échelle normale des températures. — Il résulte de ces expériences que les différentes échelles fournies par les différents thermomètres à gaz ne sont pas rigoureusement identiques ; les écarts entre 0° et 100° sont très petits, mais leur existence est certaine. Il faut donc, pour avoir une *échelle de température rigoureusement définie* faire un choix de la *nature* du gaz, de son *mode de dilatation* et de sa *pression* initiale.

Le *thermomètre normal* choisi par le Bureau International des Poids et Mesures pour définir l'échelle pratique des températures, et partout adopté aujourd'hui, est le *thermomètre à hydrogène*, fonctionnant à volume constant et chargé de gaz sous une pression de 1.000 millimètres de mercure à la température de la glace fondante.

Pour les températures élevées, cette définition est inadmissible, parce que l'on atteindrait des pressions auxquelles les appareils ne résisteraient pas. L'emploi de la méthode à volume constant, c'est-à-dire à masse invariable, est en outre mauvais à cause de la perméabilité des enveloppes aux températures élevées. Il y aurait grand intérêt à pouvoir employer un gaz autre

que l'hydrogène, et à faire fonctionner le thermomètre à masse variable.

Dans l'état actuel des expériences aux températures élevées, il est impossible d'avoir des résultats exacts à 1° près, et même pratiquement, on est loin d'arriver à cette précision. Il est très vraisemblable que l'on peut, dans ces conditions, indifféremment employer pour la construction du thermomètre normal un gaz permanent quelconque. D'après les expériences précédentes, tous les gaz auraient une dilatation un peu supérieure à celle de l'hydrogène et leur coefficient de dilatation, qui baisse à mesure que la température s'élève, se rapprocherait de celui de l'hydrogène. Pour évaluer expérimentalement l'erreur possible avec un thermomètre normal ainsi modifié on ne possède actuellement que peu de données.

M. Crafts a comparé vers 1.500° la dilatation à pression constante de l'azote et de l'acide carbonique, et a trouvé pour ce dernier le coefficient moyen 0,00368 en admettant 0,00367 pour l'azote.

Les expériences ont été faites en déplaçant, dans un tube de Meyer, l'azote par l'acide carbonique ou l'acide carbonique par l'azote :

10 cc. Az^2 déplacent	10 cc. CO^2 déplacent
10,03 de CO^2	9,95 de Az^2
10,01	9,91
10,00	9,98
10,03	9,93
9,95	Moyenne : 9,94
10,09	
Moyenne : 10,02	

Les deux mesures donnent des différences positives et négatives du même ordre de grandeur ; mais il faut remarquer que l'écart observé $\left(\frac{4}{1000} \text{ en moyenne}\right)$ ne

dépasse guère les erreurs possibles d'expérience. Quoi qu'il en soit, l'acide carbonique qui s'éloigne beaucoup des gaz permanents à la température ordinaire, n'en diffère plus d'une façon appréciable à 1.500°.

M. Violle a fait des mesures comparatives sur le pyromètre à air employé à pression et volume constant dans ses mesures sur la chaleur spécifique du platine.

Vol. constant.	Pr. constante.	Différence.
1171°	1165°	6°
1169°	1166°	3°
1195°	1192°	3°

Il y a eu, en moyenne, un écart de 4° seulement entre les deux modes d'observation, et la majeure partie de cet écart doit être imputable à des variations accidentelles de la masse gazeuse résultant de la perméabilité des enveloppes.

On peut donc affirmer qu'en employant un gaz permanent quelconque avec un mode de dilatation quelconque, on ne s'écartera certainement pas plus de 5° sur 1000° de la température de l'échelle normale, et en réalité l'écart sera sans doute beaucoup moindre, il ne doit pas atteindre 1°.

Théoriquement, il serait préférable d'employer l'hydrogène sous une pression réduite, ce qui ne donnerait certainement pas des écarts de 1° avec l'échelle normale ; mais il y a toujours à craindre le passage de ce gaz à travers les enveloppes et sa combustion par l'oxygène ou les oxydes.

Pratiquement, il vaudra mieux prendre l'azote, dont la dilatation s'écarte peu de la dilatation de l'hydrogène, moins que ne le fait l'air.

Pour les températures élevées le thermomètre normal sera donc un thermomètre à azote.

Echelle thermodynamique. — Elle est définie, en partant du principe de Carnot appliqué à un cycle réversible fonctionnant entre deux sources à température constante, par la relation

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{T_1}{T_0} \qquad (1)$$

1° *Expression approchée.* — Considérons le cycle de Carnot formé, comme l'on sait, de deux isothermes et de deux adiabatiques, et cherchons la quantité de chaleur absorbée suivant l'isotherme T_1.

Il résulte des expériences de Joule que l'on a approximativement :

$$L_1 = A \int p dv.$$

Les lois de Mariotte et de Gay-Lussac donnent :

$$pv = R\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$$

t est la température du thermomètre à gaz.

$$dv = -R\frac{dp}{p^2}\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)$$

$$L_1 = -AR\left(\frac{1}{\alpha} + t_1\right)\int_{p'_1}^{p''_1}\frac{dp}{p} = AR\left(\frac{1}{\alpha} + t\right)\log\frac{p'_1}{p''_1}$$

De même,

$$L_0 = AR\left(\frac{1}{\alpha} + t_0\right)\log\frac{p'_0}{p''_0}$$

L'équation (1) devient :

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{L_1}{L_0} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t_1}{\frac{1}{\alpha} + t_0}\left(\log\frac{p_1'}{p_1''} - \log\frac{p'_0}{p''_0}\right) \qquad (2)$$

Mais les expériences sur la détente adiabatique donnent

$$pv^{\gamma} = c^{te},$$

et en tenant compte des lois de Mariotte et de Gay-Lussac,

$$p^{\gamma - 1}\, t^{-\gamma} = c^{te}$$

Par suite $\frac{p_1}{p_0}$ ne dépend que du rapport $\frac{t_1}{t_0}$ qui est le même tout le long des deux isothermes. Donc

$$\frac{p'_1}{p'_0} = \frac{p''_1}{p''_0}$$

ou

$$\frac{p'_1}{p''_1} = \frac{p'_0}{p''_0}.$$

L'équation (2) prend alors la forme très simple

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t^{t}}{\frac{1}{\alpha} + t_0}$$

c'est-à-dire que *le rapport des températures absolues thermodynamiques est égal au rapport des températures absolues du thermomètre à gaz ;* et si, dans les deux échelles, on convient de prendre égal à 100 l'intervalle compris entre les températures de la glace fondante et de la vapeur d'eau bouillante, on a, à toute température, l'égalité

$$T = \frac{1}{\alpha} + t.$$

Mais ce n'est là qu'une première approximation, car

nous avons employé des relations qui ne sont que grossièrement approchées : lois de Joule, de Mariotte et de Gay-Lussac.

2° Reprenons le problème par une méthode plus précise. Puisque T diffère très peu de $\frac{1}{\alpha} + t$ et que les lois de Mariotte et Gay-Lussac sont approchées, on peut poser, suivant une méthode de calcul indiquée par M. Callendar

$$pv = \mathrm{RT}\,(1 - \varphi)$$

φ étant une fonction très petite de p et T (température thermodynamique).

On a alors entre la température du thermomètre à gaz et la température thermodynamique la relation

$$\frac{\frac{1}{\alpha} + t_0}{\frac{1}{\alpha} + t_0} = \frac{\mathrm{T}_1\,(1 - \varphi_1)}{\mathrm{T}_0\,(1 - \varphi_0)}$$

qui permettra de passer d'une échelle de température à l'autre si l'on connaît la valeur correspondante de φ.

Considérons, comme précédemment, le cycle de Carnot, et déterminons la chaleur de détente isotherme d'une façon plus précise, en utilisant les expériences de Thomson et Joule sur la détente à travers un tampon poreux, et celles de Regnault sur les écarts de la loi de Mariotte.

Ecrivons pour cela que les variations d'énergie entre deux états isothermes donnés sont les mêmes, soit dans la détente réversible, soit dans la détente de Joule et Thomson :

$$\mathrm{L}_1 - \mathrm{A}\int_{p'_1}^{p''_1} p\,dv = -\,\mathrm{A}\,(p''_1 v''_1 - p'_1 v'_1) + \int_{p'_0}^{p''_1} \frac{d\varepsilon_1}{dp}\,dp$$

ε étant la variation de chaleur très faible du gaz avant

et après sa sortie du tampon poreux, dans l'expérience de Joule et Thomson.

On en tire

$$L_1 = A \int_{p'_1}^{p''_1} v dp + \int \frac{d\varepsilon_1}{dp} dp \text{ (à température constante).} \quad (3)$$

car

$$d(pv) = pdv + vdp.$$

La relation

$$pv = RT(1 - \varphi)$$

donne la valeur de v :

$$v = \frac{RT}{p}(1 - \varphi)$$

qui, portée dans l'équation (3), conduit à

$$L_1 = ART_1 \int_{p'_1}^{p''_1} \frac{dp}{p} - ART_1 \int \frac{\varphi_1 dp}{p} + \int \frac{d\varepsilon_1}{dp} dp. \quad (4)$$

De même, nous aurons :

$$L_0 = ART_0 \int_{p'_0}^{p''_0} \frac{dp}{p} - ART_0 \int \frac{\varphi_0 dp}{p} + \int \frac{d\varepsilon_0}{dp} dp. \quad (5)$$

Si nous introduisons ces valeurs dans l'expression du cycle de Carnot, après division par T_1 et T_0 nous devons retomber sur une identité :

$$\frac{L_1}{T_1} - \frac{L_0}{T_0} = AR \log_e \frac{p''_1 p'_0}{p'_1 p''_0}$$

$$- \int_{p'_1}^{p''_1} \left(AR \frac{\varphi_1}{p} - \frac{1}{T_1} \frac{d\varepsilon_1}{dp}\right) dp$$

$$+ \int_{p'_0}^{p''_0} \left(AR \frac{\varphi_0}{p} - \frac{1}{T_0} \frac{d\varepsilon_0}{dp}\right) dp = 0$$

La loi de détente adiabatique donne

$$\frac{p_1'' p_0'}{p_1' p_0''} = 1 \qquad \log_e \frac{p_1'' p_0'}{p_1' p_0''} = 0$$

Il faut alors pour que l'expression se réduise à une identité que

$$\frac{1}{T}\frac{d\varepsilon}{dp} = AR\frac{\varphi}{p} \text{ ou } \varphi = \frac{d\varepsilon}{dp} p \frac{1}{AR}\frac{1}{T}$$

Or, en se reportant aux expériences sur l'air de Joule et Thomson, on trouve tous calculs faits

$$\varphi = 0{,}001173 \frac{d_1}{p_0}\left(\frac{T_0}{T_1}\right)^3$$

p_0 étant la pression atmosphérique et T_0 la température de la glace fondante.

Ce n'est encore là qu'un résultat approché, car nous nous sommes appuyés sur les expériences de Joule et Thomson et sur la loi de détente adiabatique ; cependant l'approximation est plus grande. Si elle paraît suffisante pour l'air, elle ne l'est certainement pas pour l'acide carbonique. La formule ne doit donc pas non plus être tout à fait rigoureuse pour l'air.

M. Callendar a calculé la correction à faire aux indications du thermomètre à air par extrapolation jusqu'à 1000° et a obtenu les résultats suivants :

INDICATIONS du thermomètre centigrade.	VOLUME CONSTANT		PRESSION CONSTANTE	
	φ	Δt	φ	Δt
degrés.				
0	0,001173	0	0,001173	0
100	0,000627	0	0,000457	0
200	0,000393	0,04	0,000225	0,084
300	0,000267	0,09	0,000127	0,20
500	0,000147	0,23	0,000052	0,47
1 000	0,000054	0,62	0,000012	1,19

Les écarts du thermomètre à air pour les températures élevées sont donc très faibles lorsque l'accord est établi aux points 0° et 100° ; il n'y aura pas à se préoccuper des différences entre les indications du thermomètre thermodynamique et celles du thermomètre à gaz.

On peut utiliser les mêmes expériences de Joule et Thomson pour déterminer la température absolue de fusion de la glace dans l'échelle thermodynamique.

Voici les résultats du calcul de M. Lehrfeldt ; il donne les indications suivantes correspondantes du thermomètre à gaz à volume constant et celles du thermomètre thermodynamique :

	Thermomètre à gaz.	Thermomètre thermodynamique.
Hydrogène	273,08	272,8
Air	272,48	273,27
Azote	273,13	273,2
Acide carbonique	268,47	274,83 (Thomson). 273,48 (Natanson).

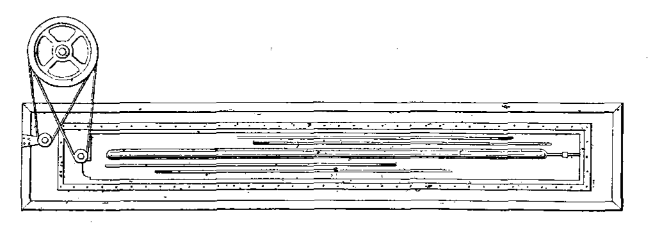
La température thermodynamique de la glace fondante devrait dans tous les cas être la même ; les écarts résultent des incertitudes que comporte la mesure de la chaleur de détente. On doit, d'après ces résultats, adopter pour la température de fusion de la glace + 273°,0 avec une incertitude sur ce nombre d'au moins 0°,2.

CHAPITRE II

THERMOMÈTRE NORMAL

Thermomètre de Sèvres. — Ce thermomètre est un thermomètre à volume constant rempli d'hydrogène pur et sec, sous la pression de 1 mètre de mercure à la température de la glace fondante. Il comprend deux parties essentielles : le *réservoir* renfermant la masse gazeuse invariable et le *manomètre* servant à mesurer la pression de cette masse gazeuse.

Le *réservoir* est formé d'un tube en platine iridié dont la contenance est de 1,03899 litre à la tempéra-



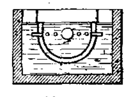


Fig. 1.

ture de la glace fondante. Sa longueur est de $1^m,10$ et son diamètre extérieur de $0^m,036$. Il est relié au manomètre par un tube capillaire en platine d'un diamètre

de 0,7 millimètre. On ne peut pas descendre plus bas sans trop ralentir l'établissement de l'équilibre des pressions.

Ce réservoir est supporté horizontalement dans une double boîte à circulation intérieure d'eau. Pour la détermination du point 100 indispensable à la graduation, le réservoir peut être placé de la même façon dans une étuve à vapeur horizontale, composée de plusieurs enveloppes concentriques.

Manomètre. — L'appareil manométrique est monté sur un support en fer de $2^{m},10$ de hauteur, qui est formé d'un rail de chemin de fer fortement boulonné sur un trépied en fer forgé. Les parties latérales opposées de ce rail, rabotées sur toute leur longueur, portent des glissières sur lesquelles les tubes manométriques et le baromètre sont maintenus.

La figure 2 représente la disposition convenablement modifiée de l'appareil manométrique. Il se compose essentiellement d'un manomètre à air libre dont la branche ouverte sert de cuvette à un baromètre. L'autre branche, fermée à mi-hauteur par une pièce d'acier, est reliée au réservoir thermométrique par le tube capillaire de platine. Les deux tubes manométriques, de 25 millimètres de diamètre intérieur chacun, s'engagent dans leur partie inférieure dans un bloc d'acier. Ils communiquent entre eux par des canaux de 5 millimètres de diamètre pratiqués dans ce bloc. Un robinet à vis permet de supprimer cette communication. Un deuxième robinet à 3 voies est vissé sur le même bloc. L'une de ses branches peut servir à l'écoulement du mercure; l'autre, à laquelle on a adapté un long tube d'acier flexible, met le manomètre en communication avec un grand réservoir de mercure, que

l'on peut déplacer verticalement le long du support, soit rapidement à la main, soit micrométriquement à l'aide d'une vis.

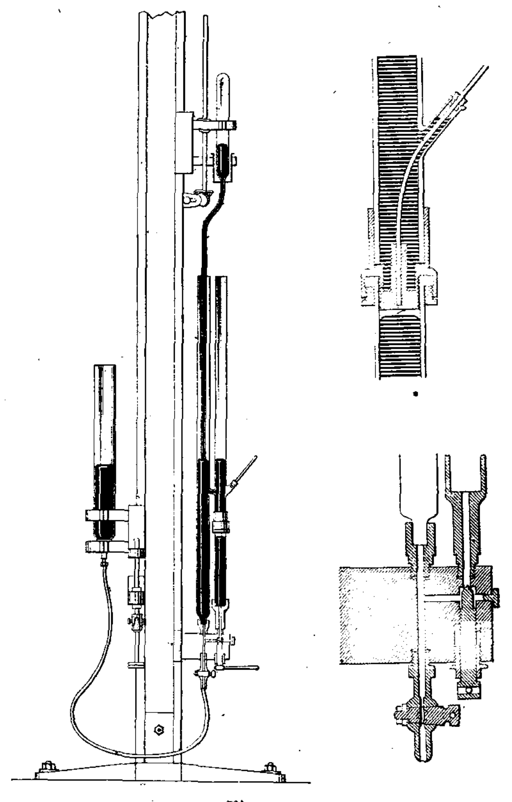


Fig. 2.

Le baromètre qui plonge dans la branche ouverte est fixé par sa partie supérieure sur un chariot dont le déplacement vertical est commandé sur une longueur de $0^m,70$ par une forte vis. Celle-ci est maintenue à ses deux extrémités par deux viroles qui lui permettent de tourner sans se déplacer longitudinalement ; elle s'engage dans un écrou, fixé sur le chariot, et porte à son extrémité inférieure un pignon denté qui engrène

avec une roue d'angle. Il suffit de faire tourner cette roue en agissant sur la tringle qui lui sert d'axe pour faire monter ou descendre le chariot avec le tube du baromètre. Ce dernier a un diamètre de 25 millimètres à sa partie supérieure. La chambre est munie de deux pointes en verre noir soudées à l'intérieur du tube à $0^m,08$ et $0^m,16$ de l'extrémité. La partie terminale de ces pointes, recourbée vers le bas, coïncide sensiblement avec l'axe de la chambre barométrique. La partie du baromètre qui s'engage dans la branche ouverte du manomètre a un diamètre intérieur de $0^m,01$ et se termine en bas par un tube plus étroit recourbé vers le haut.

La pièce d'acier qui termine la branche fermée s'adapte sur ce tube comme un bouchon, ne laissant entre elle et la paroi intérieure du tube qu'un espace très étroit qu'on a rempli de mastic. Elle s'appuie sur le bord supérieur de ce tube sur lequel elle est encore maintenue par des rondelles de cuir fortement serrées. Elle se termine à sa partie inférieure par une face polie parfaitement plane, que l'on a réglée dans un plan horizontal. Au centre de cette surface, près de l'embouchure du canal qui prolonge le tube de jonction, on a fixé une pointe en platine très fine, dont l'extrémité, destinée à servir de repère, est à une distance de $0^{mm},6$ environ de la surface plane.

Cette pièce est surmontée d'un tube de 25 millimètres de diamètre intérieur, ouvert par le haut et relié en bas à la branche ouverte du manomètre.

Comme la mesure d'une colonne de mercure s'effectue plus commodément et avec plus de précision lorsque les ménisques dont on veut connaître la différence de hauteur sont situés dans la même verticale, on a recourbé le baromètre de façon à amener dans une

même verticale l'axe de la branche fermée du manomètre et celui de la branche barométrique. Dans ces conditions, la communication entre les deux branches manométriques étant établie, la pression totale du gaz renfermé dans le réservoir du thermomètre est donnée par la différence de niveau du mercure dans ces tubes superposés.

La mesure des pressions s'opère à l'aide d'un cathétomètre muni de trois lunettes, qui sont munies chacune d'un micromètre et d'un niveau. Le tambour des micromètres est divisé en 100 parties : à la distance de laquelle on observe le manomètre, chaque division du tambour correspond à $0^{mm},002$ environ.

La méthode adoptée pour la mesure des pressions consiste à déterminer la position de chaque ménisque du mercure par rapport à une règle fixe, suspendu à proximité des tubes manométriques, à la même distance que ceux-ci des lunettes du cathétomètre.

L'une des principales difficultés que présente la mesure des pressions est celle de l'éclairage des ménisques. Le procédé employé par M. Chappuis consiste à rapprocher une pointe opaque de la surface du mercure jusqu'à ce que son image réfléchie dans le mercure apparaisse dans la lunette d'observation à une très petite distance de l'image droite. Ces deux images étant presque au contact, on parvient aisément à placer les fils du micromètre à égale distance de chacune d'elles, à l'endroit précis où doit se trouver l'image de la surface réfléchissante. Pour que l'image de la pointe apparaisse dans toute sa netteté, il convient de l'éclairer par derrière au moyen d'un faisceau lumineux passant par une fente verticale. La pointe et son image se détachent alors en noir sur un fond lumineux. L'emploi des pointes en verre noir est préférable à celui des pointes en acier, à cause

de leur inaltérabilité et de la plus grande netteté des contours.

Le procédé des pointes ne peut être employé avec avantage que dans des tubes larges, où la surface réfléchissante du mercure qui contribue à la formation de l'image ne présente pas de courbure sensible.

Espace nuisible. — Il comprend l'espace occupé par le gaz : 1° dans la partie du tube capillaire qui n'est pas soumise aux mêmes variations de température que le réservoir thermométrique ; 2° dans la pièce d'acier formant bouchon, qui surmonte la branche fermée du manomètre ; 3° dans le tube manométrique entre le mercure et le plan horizontal qui termine la pièce d'acier. Le mercure est supposé affleurer la pointe servant de repère.

La capacité du tube capillaire a été déterminée par un jaugeage au mercure ; elle a été trouvée égale à $0^{cc},567$. La longueur du tube capillaire étant de 1 mètre, si l'on retranche de cette capacité celle de 3 centimètres du tube, qui sont exposés aux mêmes températures que le réservoir, savoir $0^{cc},015$, on obtient $0^{cc},552$.

Le tube capillaire s'engage sur une longueur de 27 millimètres dans la pièce d'acier servant de bouchon. L'épaisseur totale de ce bouchon est de $28^{mm},3$; donc la partie du canal comprise entre l'extrémité du tube capillaire et la face inférieure du bouchon a $1^{mm},3$ de longueur. Comme son diamètre est $1^{mm},35$, la capacité de ce canal est $0^{cc},0019$.

L'espace compris entre une section transversale du tube manométrique passant par la pointe et la surface plane du bouchon est de $0^{cc},3126$. Pour avoir le volume total occupé par le gaz, il faut encore ajouter à cet espace le volume de mercure déprimé dans le tube manométrique par suite de la courbure du ménisque. Le rayon de ce tube

étant égal à $12^{mm},235$, on trouve pour ce volume $0^{cc},205$.

On a donc, en résumé, pour l'espace nuisible, la somme des volumes suivants :

Capacité du tube capillaire	$0^{cc},5520$
Volume du canal dans le bouchon	19
Capacité du tube manométrique entre la pointe et le plan	3126
Volume du mercure déprimé	2050
Espace nuisible total.	$1^{cc},0715$

Lorsque le mercure n'affleure pas la pointe, on aura en outre à ajouter à cette valeur $0^{cc},4772$ par millimètre d'écartement entre la pointe et le sommet du ménisque.

La *dilatation du métal du réservoir* a été mesurée par la méthode de Fizeau ; ce volume prend, aux différentes températures, les valeurs suivantes :

— 20°	$1^{l},03846$
0	1 ,03899
20	1 ,03926
40	1 ,04007
60	1 ,04061
80	1 ,04117
100	1 ,04173

La *variation de capacité du réservoir* due aux changements de pression a également été étudiée ; par millimètre de mercure, elle est de $0^{mm^3},02337$, soit

Pour	0^{mm}	0^{mm^3}
—	100	2,3
—	200	4,7
—	300	7,0
—	400	9,3

On vérifie de temps en temps le zéro en ramenant le réservoir à la température de la glace fondante ; il y a constance absolue, même après chauffage à 100°. L'écart est de $0^{mm},03$ au plus pour une pression de 995 millimètres.

Thermomètre de M. H.-L. Callendar. — Pour la gra-

duation du pyromètre à résistance de platine, M. Callendar a étudié un dispositif du thermomètre à gaz dans lequel l'espace nuisible est réduit au minimum par un dispositif ingénieux qui consiste à interposer sur le trajet du tube capillaire une colonne d'acide sulfurique que l'on ramène toujours à la même position. On peut alors laisser dans le manomètre des espaces vides de volume quelconque, ce qui simplifie les mesures.

Le *réservoir* est en verre, sa capacité est de 77^{cc},01. Le tube capillaire a un diamètre de 0,3 millimètre. Il est relié à un petit tube en U de 2 millimètres de diamètre qui renferme l'acide sulfurique. La valeur totale de l'espace nuisible est ainsi réduit à 0,84 centimètre cube.

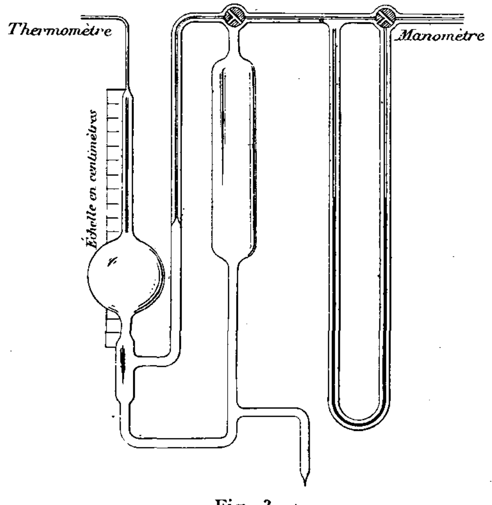


Fig. 3.

On ramène avant chaque mesure l'acide sulfurique affleurer à un trait de repère. La densité de ce liquide étant 7 fois moindre que celle du mercure, les erreurs commises sur son niveau doivent être divisées par 7 pour être exprimées en hauteur de mercure. L'emploi de cette colonne d'acide sulfurique a l'inconvénient

d'obliger l'opérateur à suivre constamment l'appareil pendant toute la durée de l'échauffement et du refroidissement afin de maintenir l'équilibre de pression de part et d'autre de cette colonne ; sans quoi elle serait chassée dans le manomètre ou absorbée dans le réservoir.

Le *manomètre* est un manomètre à air libre ordinaire que l'on lit conjointement avec la hauteur du baromètre.

Le *coefficient de dilatation* du verre dur employé pour la construction du thermomètre a été mesuré sur un tube de même fabrication, à l'aide de deux microscopes portés par une vis micrométrique. Un tube témoin froid pouvait être placé devant les microscopes pour vérifier l'invariabilité de leur distance.

Coefficient de dilatation moyen

t	α
17°	0,00000685
102°	0,00000706
222°	0,00000740
330°	0,00000769
481°	0,00000810

Après un chauffage à 400°, on a des changements permanents atteignant 0,02 à 0,05 p. 100.

Si l'on reprend le zéro à des intervalles de temps plus ou moins longs, on constate des déplacements permanents ; le tableau suivant donne quelques exemples :

DATES	THERMOMÈTRE à oxygène.	THERMOMÈTRE à azote.	OBSERVATIONS
	millimètres	millimètres	
21 janvier 1886	693,1	695,4	Remplissage fait à 300° ; mesure faite 4 jours après.
22 —	692,9	695,1	
23 —	692,9	694,9	Après chauffage à 100°.
25 —	692,0	693,8	
25 —	692,2	694,1	Après chauffage à 100°.

Ce déplacement du zéro a été attribué à une condensation partielle de l'air par le verre. Le verre, corps amorphe se *rapprochant dans une certaine mesure des liquides*, dissout des gaz, surtout aux températures élevées.

Pour les températures supérieures à 300°, cet inconvénient devient très grave surtout quand le gaz est de l'hydrogène. Ce gaz disparaît progressivement par dissolution dans le verre, ou oxydation aux dépens de ses éléments. On doit nécessairement revenir à l'azote. Ce fait a été observé par MM. Chappuis et Harker au cours d'une étude sur le pyromètre à résistance de platine au cours de laquelle les températures mesurées se sont élevées jusqu'à 600°.

Thermomètre pour les hautes températures. — Il n'a pas été réalisé jusqu'ici pour la mesure des températures élevées de thermomètre à gaz assez précis pour pouvoir être considéré comme un appareil normal. Nous indiquerons, en étudiant les pyromètres à gaz, les conditions que doit remplir un semblable appareil et les raisons de ces conditions. Nous en donnerons seulement ici un résumé sommaire.

Le gaz doit être l'azote.

Le réservoir doit être en porcelaine émaillée sur les deux faces.

Les mesures doivent être faites par la méthode du thermo-voluménomètre ou par toute autre méthode ne supposant pas l'invariabilité longtemps prolongée de la masse gazeuse.

Dans l'état actuel le thermomètre normal de Sèvres permet de faire des mesures jusqu'à 100°.

Celui de Callendar a été employé jusqu'à 600° et

pourrait sans doute, avec un réservoir de porcelaine, fonctionner convenablement jusqu'à 1000°.

On pourrait aller par la méthode du voluménomètre jusqu'à 1300°. Pour aller plus haut il faudra fabriquer une porcelaine spéciale moins fusible que la porcelaine dure ordinaire, ou à son défaut revenir au platine en atmosphère oxydante qui permettrait peut-être de monter jusqu'à 1600°.

CHAPITRE III

PYROMÈTRE A GAZ

Le thermomètre à gaz n'est pas, comme nous l'avons dit plus haut, d'un emploi obligatoire pour la mesure des températures ; il suffit de s'en servir pour le repérage des différents procédés employés dans l'évaluation des températures, mais *a priori* il n'y a pas non plus de motifs absolus pour le laisser systématiquement de côté en dehors de ces cas de repérage. En fait il a souvent été employé ; nous allons passer en revue les différentes tentatives d'emploi dont il a été l'objet et en discuter les résultats.

Matière du réservoir. — Le point le plus important à considérer est le choix de la matière qui constitue le réservoir; il faut connaître sa dilatation pour tenir compte de la variation de son volume sous l'action de la chaleur ; il faut être assuré de son imperméabilité.

Trois corps ont été employés jusqu'ici pour constituer ces réservoirs : le platine, le fer et la porcelaine.

Le *platine*, malgré son prix élevé, a été employé par Pouillet et Becquerel ; il a sur le fer l'avantage de ne pas être oxydable, sur la porcelaine celui de ne pas être fragile. Son coefficient de dilatation croît d'une façon régulière avec la température :

	Entre 0° et 100°	Entre 0° et 1000°
Coeff. moyen linéaire	0,000007	0,000009

Au cours d'une discussion très vive entre H. Sainte-Claire-Deville et E. Becquerel, le premier de ces savants découvrit que le platine était très perméable à l'hydrogène, gaz dont la présence est fréquente dans les flammes aux points où la combustion n'est pas achevée. Le platine fut alors complètement abandonné, à tort peut-être ; on peut, dans bien des cas, être certain de l'absence de l'hydrogène, et les expériences très précises de Randall ont montré que le platine au rouge était encore absolument imperméable à tous les gaz autres que l'hydrogène, même en faisant le vide à l'intérieur de l'appareil.

Le fer n'a pour lui que son bon marché ; il est aussi perméable à l'hydrogène que le platine ; il est non seulement oxydable à l'air, mais il est encore attaquable par l'acide carbonique et la vapeur d'eau. Le seul gaz que l'on puisse employer avec le fer est donc l'azote pur. Le coefficient de dilatation du fer est plus élevé et croît plus vite que celui du platine :

	Entre 0° et 100°	Entre 0° et 1000°
Coeff. moyen linéaire	0,000012	0,000015

En outre cet accroissement ne se fait pas régulièrement ; il se produit, à 850°, au moment de la transformation allotropique, un changement brusque de longueur, une contraction de 0,25 p. 100.

Le fer est très difficile à obtenir pur ; des quantités très faibles de carbone modifient un peu la valeur du coefficient de dilatation. En outre, le changement d'état de l'acier à 710°, correspondant à la récalescence, est accompagné à l'échauffement d'une contraction linéaire variant avec la teneur en carbone de 0,05 à 0,15 p. 100.

La *porcelaine* fut adoptée à la suite de la discussion entre H. Sainte-Claire-Deville et Becquerel ; elle était

considérée comme absolument imperméable, mais sans preuves bien décisives.

La porcelaine même bien cuite est constituée par une pâte un peu poreuse et perméable ; ce n'est que la couverte qui assure l'étanchéité. Mais cette couverte peut parfois présenter des solutions de continuité ; comme elle se ramollit au delà de 1 000°, elle est susceptible de se crever par place si on laisse longtemps un excès de pression à l'intérieur de l'appareil. D'après Holborn et Wien, la couverte se perce dès 1100°, quand on établit une différence de pression un peu notable dans le sens du soulèvement de cette couverte.

Enfin, comme tous les verres, la porcelaine dissout les gaz, et, en particulier, la vapeur d'eau qui la traverse assez rapidement. Un pyromètre, laissé longtemps dans la flamme vers 1 200°, se remplit de vapeur d'eau que l'on voit se condenser dans le manomètre au bout de quelques semaines.

Les expériences de M. Crafts ont montré que la vitesse du passage de la vapeur d'eau à travers la porcelaine, dans un pyromètre de 60 à 70 centimètres cubes de capacité et à la température de 1350°, était de $0^{gr},002$ de vapeur d'eau à l'heure.

On ne pourra donc employer en toute certitude la porcelaine que jusqu'à 1 000° au moins dans les procédés thermométriques qui supposent l'invariabilité de la masse gazeuse.

La dilatation de la porcelaine a été l'objet d'un grand nombre de mesures qui, pour des porcelaines de fabriques très différentes, donnent des nombres voisins : le coefficient linéaire moyen, entre 0° et 1000°, varie entre 0,0000045 et 0,000005 pour les porcelaines dures, c'est-à-dire cuites, à une température voisine de 1400°.

Voici les résultats d'expériences faites par M. H. Le

Chatelier et par M. Coupeaux; les expériences ont été faites avec des baguettes de porcelaine de 100 millimètres de longueur et les nombres ci-dessous expriment l'allongement de ces baguettes en millimètres.

	TEMPÉRATURES					
	0°	200°	400°	600°	800°	1 000°
Bayeux	»	0,075	0,166	0,266	0,367	0,466
Sèvres dure (cuite à 1 400°).	»	0,078	0,170	0,270	0,378	0,470
Limoges	»	0,076	0,168	0,268	0,360	0,465
Sèvres nouvelle (cuite à 1 400°)	»	0,090	0,188	0,290	0,390	0,490

Ces nombres doivent être triplés pour avoir la dilatation cubique.

La porcelaine présente un dernier inconvénient : la couverte n'est mise qu'à l'extérieur des récipients, de sorte que la porosité de la pâte donne une incertitude provenant de la condensation inégale des gaz aux températures croissantes.

D'après Barus, il est impossible de remplir d'air sec un pyromètre non verni intérieurement à la température ordinaire. On n'arrive pas à chasser l'eau en faisant le vide à plusieurs reprises et en y faisant rentrer de l'air sec. Un appareil rempli ainsi marquera entre la glace fondante et l'ébullition de l'eau de 150° à 200°. En le remplissant à 100°, cela ne suffit pas encore : il marquera 115° dans le même intervalle. Barus pense qu'à 400°, en répétant l'opération plusieurs fois, on pourra considérer le pyromètre comme rempli d'air sec.

Corrections et causes d'erreurs. — 1° *Thermomètre à volume constant.* — Il nous faut maintenant préciser la formule du thermomètre à air, en tenant compte des variations de volume du récipient, de la température

ambiante qui change la densité du mercure, et enfin du volume de l'espace nuisible.

Nous avons trois séries d'observations à faire pour déterminer une température donnée :

$$P_0V_0 = n_0\, RT_0$$
$$P_{100}V_{100} = n_{100}\, RT_{100}$$
$$PV = n\, RT$$

en posant

$$T = \frac{1}{\alpha} + t.$$

Les deux premières séries servent à déterminer $\frac{1}{\alpha}$. Il est préférable, sauf pour des recherches de haute précision, de prendre $\frac{1}{\alpha}$ dans les résultats antérieurs, et de ne se servir de l'expérience à 100°, si toutefois on la fait, que pour contrôler son habileté expérimentale.

En divisant la 3e équation par la 1re, on a la relation employée

$$\frac{PV}{P_0V_0} = \frac{H\Delta V}{H_0\Delta_0V_0} = \frac{n\, RT}{n_0\, RT_0} = \frac{n\, T}{n_0\, T_0} \tag{8}$$

H et H_0 sont les hauteurs du mercure, Δ et Δ_0 les densités de ce métal.

Dans une première approximation, négligeons les différences entre V et V_0, n et n_0, Δ et Δ_0. On aura alors une valeur approchée T′ de la température cherchée :

$$T' = \frac{1}{\alpha}\frac{H}{H_0} \tag{9}$$

car

$$T_0 = \frac{1}{\alpha}.$$

Voyons maintenant la *correction* dT à faire à T′ pour avoir la température exacte.

Prenons dans ce but la différentielle logarithmique de (8) :

$$\frac{dT}{T'} = \frac{d\Delta}{\Delta_0} + \frac{dV}{V_0} - \frac{dn}{n_0}. \qquad (10)$$

Puis évaluons-en les différents termes ; soient t_1 et t_2 les températures ambiantes absolues quand le récipient est aux températures T et T_0.

1°
$$\frac{d\Delta}{\Delta_0} = \frac{\Delta - \Delta_0}{\Delta_0}$$
$$\Delta = \Delta\,[1 - k\,(t_2 - t_1)]$$
$$k = 0{,}00018\,(t_2 - t_1)$$
$$\frac{d\Delta}{\Delta_0} = -\,0{,}00018\left(t_2 - t_1\right)$$

2°
$$\frac{dV}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0}$$
$$V = V_0\,[1 + k'\,(T - T_0)]$$
$$k'\ (\text{porcelaine}) = 0{,}0000135$$
$$\frac{dV}{V_0} = 0{,}0000135\left(T' - T_0\right)$$

en négligeant les variations de volume du réservoir dues aux changements de pression.

La variation de la masse gazeuse provient de l'espace nuisible entre le réservoir et le manomètre,

3°
$$-\frac{dn}{n_0} = \frac{x_2 - x_1}{n_0}$$

en appelant x_2 et x_1 les nombres de molécules contenues dans l'espace nuisible ε aux températures t_1 et t_2 ; on a en effet, N étant la masse totale contenue dans l'appareil,

$$n = N - x_2$$
$$n_0 = N - x_1$$
$$n - n_0 = -\,(x_2 - x_1)$$

Déterminons x_1 et x_2 :

$$P_0\varepsilon = x_1 R t_1$$
$$P\varepsilon = x_2 R t_2$$
$$-\frac{dn}{n_0} = \frac{\varepsilon}{V_0}\left(\frac{P}{t_2} - \frac{P_0}{t_1}\right)\frac{T_0}{P_0}.$$

En remarquant que

$$\frac{P}{P_0} = \frac{T'}{T_0}$$

il vient

$$-\frac{dn}{n_0} = \frac{\varepsilon}{V_0}\left(\frac{T'}{t_2} - \frac{T_0}{t_1}\right).$$

Posons :

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$
$$\theta = \frac{t_1 - t_2}{2}.$$

Après transformation, on a :

$$\frac{dn}{n_0} = -\frac{\varepsilon}{V_0}\left(\frac{T' - T_0}{t} - \frac{\theta}{t}\,\frac{T' + T_0}{t}\right).$$

Ces transformations successives ont eu pour but de mettre en évidence dans la formule

1° Le rapport de l'espace nuisible au volume total $\frac{\varepsilon}{V_0}$;

2° La température mesurée $T' - T_0$;

3° La variation de la température ambiante θ qui sont les trois facteurs essentiels dont dépend la correction en question.

La formule (6) devient alors :

$$\frac{dT}{T'} = -0{,}00018\left(t_2 - t_1\right) + 0{,}0000135\left(T' - T_0\right) - \frac{\varepsilon}{V_0}\left(\frac{T' - T_0}{t} - \frac{\theta}{t}\,\frac{T' + T_0}{t}\right).$$

Faisons une application numérique pour nous rendre compte de l'importance de ces termes correctifs, dans les trois cas suivants :

$$T' - T_0 = 500^\circ$$
$$T' - T_0 = 1000_o$$
$$T' - T_0 = 1500^\circ.$$

En prenant :

$$\frac{\varepsilon}{V_0} = 0{,}01,$$
$$t = 27^\circ + 273^\circ = 300^\circ,$$
$$2\theta = 10^\circ,$$

on a :

$$dT_{500} = -1^\circ{,}4 + 5^\circ{,}15 + 13^\circ{,}1 = 16^\circ{,}85$$
$$dT_{100} = -2^\circ{,}3 + 17^\circ{,}0 + 38^\circ{,}2 = 52^\circ{,}9$$
$$dT_{1500} = -3^\circ{,}7 + 35^\circ{,}7 + 90^\circ{,}0 = 122^\circ{,}5$$

Ces nombres montrent l'importance capitale de l'espace nuisible dont le volume exact est impossible à connaître. Ce procédé de calcul des corrections par les différentielles logarithmiques n'est qu'approché et ne conviendrait pas pour des mesures réelles, mais il permet de rendre plus claire la discussion générale des causes d'erreur.

Voyons quelle incertitude sur la température peut résulter de l'incertitude qui subsiste sur le volume de l'espace nuisible. En réalité, il y a un passage continu de la température élevée du pyromètre à la température ambiante sur une longueur qui peut varier de 10 à 30 centimètres, suivant l'épaisseur des parois du four. Les volumes du réservoir et de l'espace nuisible que l'on doit prendre pour que les formules ci-dessus soient exactes doivent être tels que la pression réelle soit égale à la pression que l'on aurait en supposant un

changement brusque et total de la température à un point limite fictif, séparant la partie chauffée du réservoir de la partie froide. On estime la position probable de ce point, et si l'estimation est mal faite, on commet deux erreurs, l'une sur le volume réel chauffé, et l'autre sur le volume de l'espace nuisible, erreurs égales et de signe contraire, en ce qui concerne le volume.

Pour le calcul de cette *erreur*, on peut comme pour le calcul des corrections employer la méthode des différentielles logarithmiques.

Appliquant la même formule que ci-dessus, on trouve pour l'erreur relative $\frac{dT}{T}$:

$$\frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V_0}\left(\frac{T' - T_0}{t} - \frac{\theta}{t} \cdot \frac{T' + T_0}{t}\right),$$

et en négligeant le deuxième terme de la parenthèse qui est relativement très petit :

$$\frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V_0}\left(\frac{T' - T_0}{t}\right)$$

Soit la section du tube capillaire égale à 1 millimètre carré, le volume du récipient 100 centimètres cubes, et une incertitude de 100 millimètres sur la position du point de passage, ce qui n'est pas toujours exagéré, on trouve les erreurs suivantes sur les températures :

$$dT_{500} = 1^{\circ},7$$
$$dT_{1000} = 3^{\circ},9$$
$$dT_{1500} = 8^{\circ},5.$$

On peut donc compter que à 1 000°, l'erreur résultant de l'incertitude sur l'origine de l'espace nuisible peut atteindre plusieurs degrés pour un réservoir de 100 centimètres cubes.

Une seconde cause d'erreur résulte des changements de masse par suite des entrées ou des sorties de gaz. On aurait de même par les différentielles logarithmiques :

$$\frac{dT}{T} = - \frac{dn}{n_0}.$$

Reportons-nous à l'expérience de M. Crafts. Il rentre par heure à 1 350° dans un réservoir de 100 centimètres cubes en porcelaine, $0^{gr},002$ de vapeur d'eau, soit 0,225 molécule-milligramme ; le volume initial renfermé au début est 4, 5 molécules-milligrammes :

$$\frac{dT}{T} = \frac{0,225}{4,5} = 0,05$$

ce qui conduit à une erreur de

$$dT_{1350^\circ} = 70^0 \text{ environ}$$

pour une expérience ayant duré 1 heure.

Ce calcul met en évidence les erreurs énormes, pouvant résulter de la pénétration d'un gaz étranger, dans l'espace d'une heure, durée bien inférieure à la durée habituelle des expériences. Il est vrai que cette erreur décroît vite avec la température, et elle est très probablement nulle à 1 000° s'il n'y a pas de défaut dans la couverte.

2° *Thermomètre à pression constante.* — Nous employons toujours la même formule (4) :

$$\frac{H\Delta V}{H_0\Delta_0 V_0} = \frac{nRT}{n_0RT_0}$$

qui donne dans une première approximation,

$$\frac{T'}{T_0} = \frac{n_0}{n}$$

En appelant t_1 et t_2 les températures ambiantes absolues correspondant à T_0 et T, u_1 et u_2 les volumes correspondants de l'espace nuisible et du mesureur. On a pour déterminer n et n_0 les relations

$$n_0 = N - x_1 = \frac{H_0 \Delta_0 V_0}{T_2 . T_1},$$
$$n = N - x_2,$$
$$n = n_0 - (x_2 - x_1),$$
$$x_2 = \frac{H \Delta \, u_2}{R t_2},$$
$$x_1 = \frac{H_0 \Delta_0 u_1}{R t_1}.$$

Comme précédemment, il faut faire subir une correction à la température approchée T′ ainsi obtenue.

$$\frac{dT}{T'} = \frac{dH}{H_0} + \frac{d\Delta}{\Delta_0} + \frac{dV}{V_0}$$

expression dont les termes ont une valeur connue.

Voyons maintenant les causes d'erreur et discutons leur importance.

L'erreur résultant de l'incertitude sur la limite du volume chaud et froid est :

$$\frac{dT}{T'} = \frac{dn_0}{n_0} - \frac{dn}{n} = \frac{dn_0}{n_0}\left(1 - \frac{T'}{T_0}\right) = -\frac{dn_0}{n_0}\left(\frac{T' - T_0}{T_0}\right).$$

Soit comme précédemment :

$$\frac{dn}{n_0} = \frac{1}{1\,000}.$$

On trouve :

$$dT_{500} = 1^{\circ},5,$$
$$dT_{1000} = 5^{\circ},$$
$$dT_{1500} = 9^{\circ},3.$$

Les erreurs de ce fait sont donc plus grandes encore que dans la méthode à volume constant.

Pour faire exactement la correction due à l'espace nuisible, on peut employer la méthode du *compensateur* de Regnault, comme l'ont fait Sainte-Claire-Deville et Troost; cela permet alors de placer les appareils de mesure très loin du feu, ce qui facilite beaucoup les expériences.

Examinons maintenant l'erreur résultant des rentrées des gaz extérieurs :

$$\frac{dT}{T'} = \frac{dn}{n} = \frac{dn_0}{n_0} \frac{T}{T_0}$$

Pour l'expérience de M. Crafts, l'erreur serait de 413° au lieu de 70°, le réservoir étant initialement rempli à la pression atmosphérique.

On voit donc qu'à tous les points de vue, la méthode à volume constant est plus précise que celle à pression constante ; le défaut de résistance des enveloppes est le seul obstacle qui s'oppose à son emploi dans la pratique.

3° *Thermomètre voluménomètre.* — La seule méthode rationnelle pour la mesure des températures élevées est, comme nous l'avons déjà dit, celle dite du voluménomètre de Becquerel, qui n'exige pas l'invariabilité de la masse gazeuse pendant toute la durée de l'expérience. Elle consiste à mesurer les changements de pression résultant d'une variation donnée de la masse gazeuse contenue dans le réservoir. Becquerel employait des changements de masse très faibles ; les changements de pression sont alors également faibles, ce qui diminue la précision des mesures.

Il n'y a aucun inconvénient théorique à arriver au vide absolu, ou ce qui est pratiquement plus simple au

vide de la trompe à eau, comme l'ont fait MM. Mallard et Le Chatelier ; cela augmente considérablement la précision. Si le vide est absolu, on a la relation

$$\frac{PV}{RT} = n = \frac{P_0 u_0}{RT_0}$$

u_0 étant le volume du mesureur correspondant à la température ambiante T_0. Si les deux capacités sont remplies sous la pression atmosphérique, on a $P = P_0$ et alors

$$\frac{T'}{T_0} = \frac{u}{V}.$$

Il y a deux corrections à faire : la première relative à la dilatation de l'enveloppe, la deuxième à la différence entre P et P_0 quand le vide a été fait au moyen de la trompe :

$$\frac{dT}{T'} = \frac{dP}{P} + \frac{dV}{V}.$$

En général, dP est voisin de 15 millimètres de mercure, ce qui donne

$$\frac{dP}{P} = 0{,}02.$$

De plus,

$$\frac{dV}{V} = 0{,}0000135 \left(T' - T_0\right),$$

$$\frac{dT}{T'} = -0{,}02 + 0{,}0000135 \left(T' - T_0\right).$$

En calculant cette correction pour différentes températures, nous avons :

$$dT_{500} = -10^\circ{,}4$$
$$dT_{1000} = -8^\circ{,}5$$
$$dT_{1500} = -0^\circ{,}35$$

Calculons maintenant l'erreur qui résulte de l'incertitude sur la position de la ligne de séparation de la partie chaude et de la partie froide ; c'est la seule qui subsiste d'ailleurs.

$$\frac{dT}{T'} = \frac{dV}{V}.$$

En admettant comme précédemment la limite supérieure de $\frac{1}{1\,000}$,

$$\frac{dT}{T'} = \frac{1}{1\,000}$$

ce qui conduit à

$$dT_{500} = 0°,77,$$
$$dT_{1000} = 1°,27,$$
$$dT_{1500} = 2°,77.$$

A tous les points de vue, cette méthode est donc supérieure aux autres.

Toute cette discussion des causes d'erreur dans la mesure des températures ne vise que la détermination même de la température du pyromètre employé. Mais cette température elle-même n'est pas l'objet réel des mesures ; ce n'est qu'un intermédiaire pour arriver à la connaissance de la température de certains autres corps supposés en équilibre de température avec le pyromètre. Or cet équilibre est extrêmement difficile à réaliser, et l'on n'a le plus souvent aucun moyen de s'assurer de l'exactitude avec laquelle il a été obtenu. Il y a là une nouvelle cause d'erreur très importante dans la mesure des températures, surtout des températures élevées pour lesquelles le rayonnement prend une importance considérable. Dans une enceinte dont la température n'est pas uniforme, ce qui est le cas de la plupart

des fours, il peut y avoir des écarts énormes de température entre des points voisins. On ne saurait signaler avec trop d'insistance cette cause d'erreur dont bien des expérimentateurs ne se sont pas suffisamment préoccupés.

Résultats expérimentaux. — Nous étudierons maintenant les expériences faites par différents savants, et nous verrons dans quelle mesure les conditions de précision indiquées au cours de cet exposé ont été réalisées.

Expériences de Pouillet. — Pouillet est le premier qui

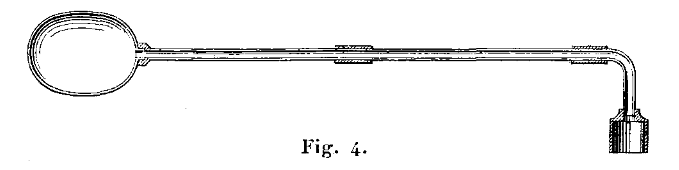


Fig. 4.

se soit servi de thermomètre à air pour la mesure des températures élevées ; il a obtenu des nombres très bons pour l'époque.

Son pyromètre était constitué par un réservoir en platine, de forme ovoïde, de 60 centimètres cubes de capacité, auquel était soudé à l'or un tube capillaire en platine de 25 centimètres de longueur ; à ce tube faisait suite un autre tube en argent de même longueur, aboutissant au manomètre. La réunion entre les tubes de platine et d'argent était faite à l'aide d'un manchon métallique (fig. 4). L'espace nuisible avait ainsi un volume de 2 centimètres cubes.

Le manomètre était constitué par trois tubes de verre mastiqués à leur partie inférieure dans une garniture métallique : le premier tube servant de mesureur était divisé en centimètres cubes, le second constituait le

manomètre proprement dit, le troisième servait au remplissage de l'appareil.

Un robinet, convenablement disposé, permettait de faire varier la quantité de mercure contenu dans l'appareil (fig. 5). Le principe de cet appareil est le même que celui du manomètre plus récent de Regnault ; ce dernier diffère du manomètre de Pouillet seulement par la suppression du troisième tube qui est remplacé par un flacon réuni au robinet de vidange par un caoutchouc.

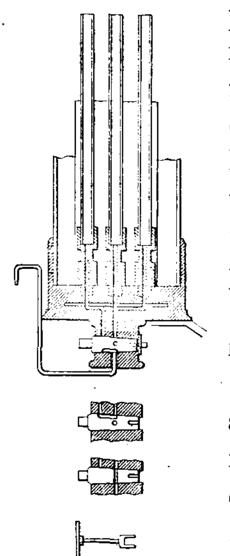


Fig. 5.

Erreurs : 1° D'après Pouillet, il était impossible de faire de mesures jusqu'à 120° ; il y avait discordance complète avec les indications du thermomètre à mercure ; il attribue ce désaccord à la condensation de l'air sur le platine. Becquerel montra plus tard qu'il était dû à la présence de la vapeur d'eau dans l'air insuffisamment desséché.

2° Ne pouvant ainsi employer le point 100 pour la détermination du coefficient de dilatation de l'air, Pouillet a pris le nombre 0,00375, donné par Gay-Lussac, au lieu du nombre exact 0,00367. C'est la principale cause d'erreur de ses mesures ; le tableau suivant permettra de comparer les résultats, qu'il a obtenus pour la chaleur spécifique du platine, à ceux de M. Violle :

	100°	300°	500°	700°	1 000°	1 200°
Pouillet ($\alpha = 0{,}00375$).	0,0335	0,0343	0,0352	0,0360	0,0373	0,0380
— ($\alpha = 0{,}00367$).	328	336	345	353	366	373
Violle.	323	335	347	359	377	389

Points de fusion. — Les déterminations de Pouillet, relatives aux points de fusion, sont beaucoup moins bonnes :

Or	1 180 (trop élevée de 110°)
Argent	1 000 (— 40°)
Antimoine.	432 (trop basse de 200°)
Zinc	423 (bon)

Les causes d'erreur possibles sont les suivantes :

1° Introduction d'hydrogène dans le réservoir en platine, ce qui devait surélever la mesure de la température, par suite diminuer la chaleur spécifique du platine : les points de fusion de l'or et de l'argent se sont alors trouvés erronés par excès.

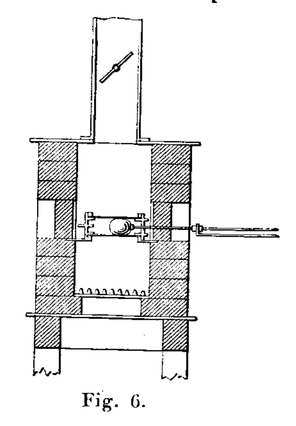


Fig. 6.

2° Équilibre de température douteux avec le dispositif de four employé. Un tube de terre, chauffé par-dessous avec du charbon, devait nécessairement donner un chauffage plus fort vers le bas ; il aurait donc fallu, pour avoir des mesures exactes dans ce milieu, certainement très irrégulier comme température, que le corps et le thermomètre fussent dans les mêmes conditions au point de vue du rayonnement (fig. 6).

Pour l'antimoine, l'erreur a du être certainement d'ordre tout spécial ; ou bien le métal très impur était mêlé de plomb, ou peut-être y a-t-il eu simplement une faute de calcul. Cependant le nombre 432 est resté le seul adopté jusqu'au mémoire récent de M. Gautier sur la fusibilité des alliages.

Expériences d'Ed. Becquerel. — Ce savant reprit et

continua les travaux de Pouillet, avec les mêmes appareils. Mais à la suite d'une discussion avec H. Sainte-Claire-Deville au sujet de la perméabilité du platine, il se servit successivement de pyromètres en fer et en porcelaine. Les résultats obtenus avec le platine semblent cependant de beaucoup les meilleurs.

	Pyr. en Pt.	Pyr. en porcelaine.
Ebullition du zinc.	930° (bon)	890°
Fusion de l'argent	960° (bon)	916°
Fusion de l'or	1 092°	1 037°

Les nombres relatifs à l'or sont différents d'environ 25° en plus ou en moins.

Il est difficile d'expliquer ces écarts qui sont probablement dus à une inégalité de température entre le pyromètre et le métal étudié, résultats peut-être d'une différence dans leurs pouvoirs émissifs.

Expériences de H. Sainte-Claire-Deville et Troost. — H. Sainte-Claire-Deville et Troost firent lors de leur discussion avec Becquerel de nombreuses expériences avec le thermomètre à air en porcelaine ; ils obtinrent des résultats très discordants qu'ils ne publièrent pas sur le moment.

Ils donnèrent la préférence aux déterminations faites à l'aide de la vapeur d'iode (nous en parlerons plus loin) ; mais lorsque l'inexactitude de cette méthode fut démontrée, ils firent connaître les résultats qu'ils avaient obtenus pour l'ébullition du zinc.

Ils employèrent un creuset en plombagine, pouvant contenir 15 kilogrammes de zinc ; le métal était remplacé au fur et à mesure de sa volatilisation.

Le creuset était placé dans un fourneau plein de charbon. Autour du pyromètre, était disposée une enve-

loppe de terre réfractaire ; mais ce dispositif était tout à fait insuffisant pour éliminer les erreurs dues au rayonnement. Les mêmes mesures furent répétées avec des gaz différents.

Nombres obtenus :

NATURE DU GAZ	1re SÉRIE	2e SÉRIE	3e SÉRIE
Air	De 945° à 955°	De 940° à 948°	De 928° à 932°
Hydrogène. . . .	De 925° à 924°	De 916° à 924°	»
Acide carbonique.	1 067°	1 079°	»

Les écarts semblent être fonction de la nature du gaz, ce qui est inexplicable : il faudrait admettre une dissociation énorme de l'acide carbonique pour expliquer les températures trouvées avec ce gaz.

Plus tard, cette méthode fut modifiée. Le gaz renfermé dans le pyromètre était extrait au moyen de la trompe à mercure, soit à chaud, soit après refroidissement. Mais ce procédé ne présente pas d'avantages réels : on n'évite pas la rentrée des gaz et des vapeurs pendant le chauffage ; de plus, pendant le refroidissement, on s'expose aux rentrées d'air par les *fuites* du robinet placé à la sortie du pyromètre. M. Troost a trouvé ainsi le nombre 665° pour le point d'ébullition du sélénium ; ce chiffre est trop élevé. De même que pour les déterminations relatives à l'ébullition du zinc, le dispositif employé pour le chauffage ne protégeait pas suffisamment contre le rayonnement des parois.

Expériences de M. Violle. — Guidé par H. Sainte-Claire-Deville, que ses échecs successifs avaient instruit des difficultés du problème, M. Violle a fait un ensemble de mesures qui sont au nombre des meilleures faites

jusqu'ici. Il s'est servi d'un thermomètre en porcelaine, et il opérait à la fois à pression et à volume constants. L'accord des deux nombres montre si la masse est restée invariable : c'est l'équivalent de la méthode de Becquerel.

Le reproche le plus grave que l'on puisse faire à ces expériences provient de l'incertitude sur l'égalité de température du pyromètre et celle du corps à étudier placé à côté ; à ce point de vue cependant, ces expériences, faites dans le four Perrot, ont été bien plus satisfaisantes que celles faites dans les foyers au charbon employés auparavant.

1° Une première série de déterminations a porté sur la chaleur spécifique du platine. Une masse de platine de 423 grammes était placée dans un moufle Perrot à côté du pyromètre, et lorsqu'elle était en équilibre de température, elle était immergée, soit directement dans l'eau, soit dans une éprouvette en platine placée, l'orifice en haut, au milieu de l'eau du calorimètre. Dans le premier cas, l'expérience était faite en quelques secondes ; dans le deuxième, elle durait quinze minutes et la correction s'élevait à 0°,3 sur 10° : les résultats ont cependant été concordants. A 787°, deux expériences ont donné 0,0364 et 0,0366 ; moyenne : 0,0365.

A 1 000°, douze expériences ont été faites en employant les deux méthodes d'immersion ; les nombres trouvés varient de 0,0375 à 0,0379 ; moyenne : 0,0377.

Vers 1 200°, les mesures ont été faites à pression et à volume constants.

TEMPÉRATURE à volume constant.	TEMPÉRATURE à pression constante	MOYENNE	CHALEUR spécifique du Pt.
degrés.	degrés.	degrés.	
1 171	1 165	1 168	0,0388
1 169	1 166	1 168	0,0388
1 195	1 192	1 193	0,0389

La chaleur spécifique moyenne peut être représentée par la formule :

$$C_0^t = 0{,}0317 + 0{,}000006\ t$$

La chaleur spécifique vraie est égale à :

$$\frac{dq}{dt} = 0{,}0317 + 0{,}000012\ t.$$

M. Violle s'est servi de ces déterminations pour fixer, par extrapolation, le point de fusion du platine, qu'il a trouvé égal à 1779°. Il a mesuré pour cela la quantité de chaleur cédée par 1 gramme de platine solide, du point de fusion à 0°. A cet effet, on fondait une certaine quantité de platine, on plongeait dans ce platine fondu un fil du même métal contourné en spirale, et, au moment où la surface du bain se solidifiait, on enlevait, à l'aide de ce fil, une rosette de platine solide que l'on immergeait dans l'eau du calorimètre. En reprenant la détermination de ce point de fusion, MM. Holborn et Wien ont trouvé plus récemment 1 780°.

La chaleur latente de fusion du platine est égale à $74^c{,}73 \pm 1{,}5$; ce nombre résulte de cinq expériences.

2° Une deuxième série d'expériences se rapporte à la chaleur spécifique du *palladium ;* les déterminations ont été faites, en partie par comparaison avec le platine,

en partie par le thermomètre à air ; les résultats obtenus par les deux méthodes sont concordants.

La chaleur spécifique moyenne est donnée par la formule :

$$C_0^t = 0,0582 + 0,000010\ t.$$

La chaleur spécifique vraie est égale à :

$$\frac{dq}{dt} = 0,0582 + 0,000020\ t.$$

Le point de fusion a été trouvé égal à 1 500° ; les expériences plus récentes de MM. Holborn et Wien donnent 1 580°. Cet écart peut s'expliquer par les impuretés du métal et l'absorption des gaz du foyer.

La chaleur latente de fusion du palladium mesurée dans les mêmes expériences a été trouvée de $36^{c},3$.

3° Dans une autre série d'expériences, M. Violle a déterminé le point d'ébullition du zinc. Il employa un appareil de fonte émaillée, chauffé dans une triple enveloppe de vapeur métallique ; le haut était recouvert de terre et de poil de vache pour empêcher la surchauffe des parois. Les mesures ont été faites à pression et volume simultanément variables.

Volume du ballon	$294^{cc},5$	Volume du gaz sorti	$184^{cc},3$	
Espace nuisible	$4^{cc},7$	Pression	$892^{mm},3$	T = 929°6
t_0	3°,8	t_0	7°,7	
H_0	$760^{mm},5$	H_0	$759^{mm},5$	

Barus, Holborn et Wien ont trouvé des nombres très voisins de 930°.

4° Une dernière série est relative aux points de fusion des métaux qui ont été déterminés par comparaison avec la chaleur d'échauffement du platine :

Argent.	954°	(trop faible de 10°)
Or	1045°	(— 20°)
Cuivre.	1050°	(— 20°)

Expériences de Mallard et H. Le Chatelier. — Dans leurs recherches sur les températures d'inflammation des mélanges gazeux, Mallard et H. Le Chatelier se sont servi d'un pyromètre en porcelaine, dans lequel on fait le vide ; puis on y laisse rentrer l'air en mesurant le volume gazeux ainsi absorbé. On peut aller jusqu'à 1 200° sans constater d'affaissement de la porcelaine ; mais cet affaissement devient complet à 1 300°, sous l'action du vide.

Cette méthode a été employée de la façon suivante pour la mesure des températures d'inflammabilité des mélanges gazeux. On faisait le vide dans l'appareil, et l'on mesurait la température par le volume d'air qui le remplissait ; on faisait le vide de nouveau et on remplissait l'appareil avec le mélange gazeux. On savait s'il y avait ou non inflammation par la comparaison du volume du mélange avec celui de l'air introduit dans les mêmes conditions de température, au moins dans les cas de mélanges brûlant avec contraction.

Le pyromètre employé avait une capacité de 62^{cc}, défalcation faite de l'espace nuisible (1^{cc}) ; le tableau suivant donne les volumes d'air correspondant à différentes températures :

400°	26^{cc},7
600°	20,6
800°	16,7
1000°	14,1
1200°	12,2

En admettant que les mesures des volumes soient faites à 0^{cc},1 près, on aurait à 1000° une précision de 10° seulement à cause du volume insuffisant (63^{cc}) du réservoir thermométrique.

Expériences de Barus. — Ce savant américain a com-

biné un appareil tournant, remarquable au point de vue de l'uniformité de température, mais il ne l'a appliqué directement qu'à la graduation de couples thermo-électriques. Il a opéré à pression constante. Au moyen des couples ainsi gradués il a déterminé les points d'ébullition du zinc (926°-931°) et du cadmium (773°-784°) ; le point d'ébullition du bismuth a été trouvé égal à 1 200° sous une pression réduite de 150 millimètres, ce qui donnerait sous la pression atmosphérique par extrapolation 1 500°.

La figure 7 représente la section longitudinale de l'appareil de M. Barus.

Il se compose essentiellement d'un pyromètre en por-

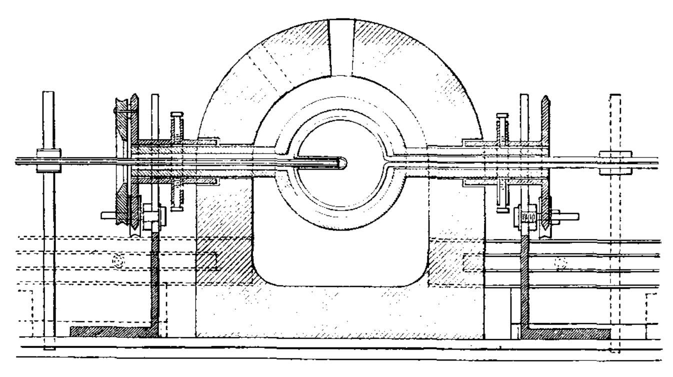


Fig. 7.

celaine présentant un tube rentrant dans lequel est logé le couple. Le pyromètre fixé par un point de sa tige est maintenu immobile. Il est entouré par un moufle en fonte dont la forme générale est de révolution autour de l'axe du pyromètre, ce moufle est composé de deux moitiés semblables maintenues au moyen de colliers en fer et peut être animé d'un mouvement de rotation autour de son axe de figure, de façon à assurer l'uniformité du chauffage. Il est chauffé par des brûleurs à

gaz placés en dessous. Une enveloppe fixe en terre réfractaire maintient la chaleur autour du moufle en fer.

Expériences d'Holborn et Wien. — Holborn et Wien ont fait une graduation très complète du couple thermo-électrique Pt-Pt rhodié proposé par M. H. Le Chatelier. Ils emploient un réservoir en porcelaine de 100 centimètres cubes environ de capacité, terminé à ses deux extrémités par un tube capillaire en porcelaine. La soudure thermo-électrique est placée à l'intérieur du réservoir, et chacun des fils sort par un des tubes latéraux; ce dispositif permet de déterminer en ses différents points la température réelle de l'espace nuisible, dont le volume est de $1^{cc},5$.

Ils ont opéré à volume constant, avec une pression initiale très réduite pour rester toujours en dépression; ils ont pu aller ainsi jusqu'à 1 430°. Au-dessus de 1 200°, ils ne pouvaient faire qu'une seule opération avec un pyromètre; au-dessous, une dizaine d'opérations.

Ils ont déterminé le coefficient de dilatation de leur porcelaine, venant de la manufacture de Berlin, et l'ont trouvé égal à 0,0000045, nombre identique à celui donné par M. H. Le Chatelier pour la porcelaine de Bayeux.

Ils se sont servi de ce pyromètre, en employant comme intermédiaire un couple, pour fixer les points de fusion de quelques métaux :

Argent	970°
Or	1072°
Palladium	1580°
Platine	1780°

Ces nombres comptent parmi ceux qui semblent actuellement mériter le plus de confiance; il faut cepen-

dant reconnaître que le volume du réservoir était trop faible pour assurer une très grande précision. Nous reviendrons sur ces expériences à propos des pyromètres électriques.

Programme d'expériences. — La discussion à laquelle nous venons de nous livrer permet de définir certaines conditions auxquelles devront satisfaire les nouvelles expériences nécessaires pour préciser davantage les températures de fusion et d'ébullition employées comme points fixes dans la graduation des autres pyromètres.

Le réservoir du thermomètre devra être en porcelaine émaillée intérieurement et extérieurement, comme les réservoirs qui ont été fabriqués à la manufacture de Sèvres à l'occasion de certaines expériences de Regnault et de H. Sainte-Claire-Deville.

La capacité des réservoirs devra autant que possible être voisine de 500 centimètres cubes, condition nécessaire pour que l'erreur pouvant résulter de l'espace nuisible soit certainement inférieure à 1°.

Le gaz thermométrique sera l'azote.

On emploiera la méthode dite du voluménomètre, ou toute méthode équivalente ne supposant pas l'invariabilité de la masse gazeuse, et on produira les plus grands changements de pression compatibles avec la résistance de la porcelaine. Jusqu'à 1 200° on doit faire le vide complet puisqu'il n'y a pas à craindre de déformer le réservoir.

Enfin des précautions toutes spéciales seront prises pour assurer l'équilibre de température entre le réservoir du pyromètre et le corps dont on veut mesurer la température. Le dispositif de Barus paraît théoriquement très satisfaisant, mais il est bien compliqué et coûteux. On peut encore se servir de moufles complètement entourés de flammes comme dans la fabrication de la por-

celaine ; la température y est très uniforme. Mais leur emploi présente une difficulté pratique sérieuse ; la tige du pyromètre quoique bien protégée, se casse fréquemment au point où elle traverse le compartiment de flammes.

Le plus pratique sera peut-être d'employer des bains liquides, sels fondus non volatils, par exemple, maintenus en agitation continuelle, dans lesquels plongeraient à la fois le réservoir du pyromètre et le corps dont on voudrait prendre la température, le chauffage étant obtenu par la combustion du gaz dans un four Perrot, ou par le courant électrique traversant une spirale métallique immergée dans le bain.

Si l'on doit se contenter de four à gaz ordinaire, four Perrot ou mieux four Seger, il faudra explorer au moyen d'un couple thermo-électrique la répartition de la température dans toute la région utilisée.

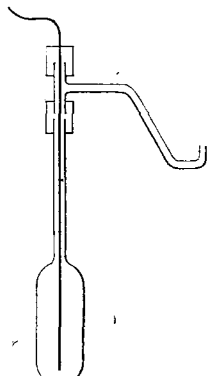
PROCÉDÉS INDIRECTS

Nous rangerons dans cette catégorie différentes expériences dans lesquelles les lois de la dilatation des gaz n'ont été utilisées que d'une façon indirecte, ou ont été étendues à des vapeurs.

Méthode de Crafts et Meier. — C'est une variante du procédé de H. Sainte-Claire-Deville et Troost consistant à enlever le gaz par le vide. Crafts et Meier déplacent le gaz du pyromètre par l'acide carbonique ou l'acide chlorhydrique, gaz facilement absorbables par des réactifs appropriés. L'acide chlorhydrique est plus commode, car son absorption par l'eau est immédiate ; mais il y a à craindre aux températures élevées son action sur l'air avec formation de chlore ; il est préférable d'employer l'azote au lieu de l'air.

L'appareil (fig. 8) comporte un réservoir en porcelaine, dont la tubulure est assez large pour laisser passer le tube d'arrivée du gaz qui pénètre jusqu'au fond du réservoir ; ce dispositif augmente considérablement l'influence de l'espace nuisible, et par suite diminue la précision des déterminations.

Cette méthode convient surtout pour les expériences sur les densités de vapeur qui se font dans le même appareil ; elle permet alors d'avoir une idée approchée des températures auxquelles on expérimente.


Fig. 8.

Crafts et Meier ont ainsi déterminé les variations de densité de la vapeur d'iode en fonction de température.

Regnault avait proposé antérieurement, sans l'employer d'ailleurs, une méthode analogue :

1° On remplit d'hydrogène un récipient en fer porté à la température que l'on veut mesurer, on balaye cet hydrogène par un courant d'air ; à sa sortie du réservoir métallique, l'hydrogène passe sur une colonne de cuivre portée au rouge, et l'eau formée est absorbée par des tubes à ponce sulfurique et pesée. Ce procédé, très compliqué, est mauvais à cause de la perméabilité du fer aux températures élevées.

Il a en même temps indiqué la méthode suivante :

2° On prend une bouteille en fer contenant du mercure ; le vase étant incomplètement fermé, on chauffe à la température cherchée, on laisse refroidir et on pèse le mercure restant. Cette méthode est encore défectueuse par suite de la perméabilité du fer aux températures élevées ; l'hydrogène des gaz du foyer pourrait

pénétrer à l'intérieur du récipient et chasser une quantité équivalente de vapeur de mercure.

Méthodes de H. Sainte-Claire-Deville. — 1° Ce savant a cherché en premier lieu à mesurer la température par un procédé analogue à celui de la détermination des densités de vapeur de Dumas. Il prenait un ballon en porcelaine plein d'air, et le faisait chauffer dans l'enceinte dont il s'agissait de déterminer la température, et le fermait au chalumeau oxhydrique par la soudure autogène. Il mesurait l'air restant en ouvrant le ballon sur l'eau et en pesant l'eau entrée, ou bien il déterminait simplement la perte du poids du ballon avant et après chauffage.

Des expériences faites sur le point d'ébullition du cadmium ont donné 860° ; les données du calcul étaient les suivantes :

$$H = 766^{mm},4,$$
Volume du ballon = 285 centimètres cubes,
— air resté = 72 — .

Voici d'ailleurs comment peut être conduit le calcul.

Soit 17° la température ambiante ; $T_0 = 273° + 17° = 290°$.

$$T' = 290 \times \frac{285}{72} = 1\,150°$$

La correction due à la dilatation de la porcelaine est :

$$0{,}0000135 \times 850 = 13°$$

Ce qui donne pour la température d'ébullition du cadmium :

$$t = 1\,150° - 273° - 13° - 864°$$ [1]

(1) Ce résultat diffère un peu de celui donné par Sainte-Claire-Deville parce qu'on a pris comme coefficient de dilatation de la porcelaine les derniers nombres obtenus ; de plus, la température ambiante admise 17° diffère peut-être de la température réelle de l'expérience qui n'est pas donnée.

Le nombre 860 est trop fort; il y a dans ces expériences deux causes d'erreurs possibles : le chauffage non uniforme par suite du rayonnement, et la possibilité de l'existence de vapeur d'eau dans le ballon.

De plus, le faible poids de l'air et la difficulté de fermer le récipient d'une façon absolument étanche rendent les expériences très délicates.

2° Dans une seconde méthode qui a l'avantage de remplacer l'air par une vapeur très lourde, Deville est revenu à l'idée de Regnault consistant à utiliser la vapeur de mercure; mais il s'est heurté à une difficulté pratique. Il avait remplacé les récipients perméables en fer par des récipients en porcelaine : le mercure se condensait dans le col du pyromètre et retombait en gouttelettes froides qui amenaient la rupture du réservoir.

Pour cette raison, il abandonna le mercure et le remplaça par l'iode : le retour d'un liquide froid était complètement évité à cause du voisinage du point d'ébullition de ce corps (175°) et de son point de fusion (113°). Un grand nombre d'expériences furent faites par cette méthode; le point d'ébullition du zinc par exemple fut trouvé égal à 1039°.

Les données étant

$$H = 758^{mm},22$$

Volume du ballon.	=	277 centimètres cubes.
Augmentation de poids. Iode-air . .	=	$0^{gr},299$
Volume de l'air restant	=	$2^{cc},16$
Densité de vapeur d'iode.	=	$8^{cc},716$

on peut conduire le calcul de la manière suivante.

Si la température ambiante est 17°, le poids théorique de la vapeur d'iode contenu dans le ballon à cette température serait :

$$1,293 \times 8,716 \times 0,277 \times \frac{273}{290} = 2^{gr},92$$

Le poids d'iode resté dans le réservoir est, en tenant compte de la correction à faire résultant des $2^{cc},16$ d'air qui occupent $8^{cc},9$ à 930° :

$$0,299 + 1,293\left(0,277 - 0,00216\right)\frac{273}{290} = 0^{gr},634.$$

S'il n'y avait pas eu d'air, le poids aurait été :

$$0,634 \times \frac{277 + 8,9}{277} = 0^{gr},652,$$

$$\frac{T'}{T_0} = \frac{2,920}{0,652},$$

$$T = 1\,290°.$$

Faisant la correction due à la dilatation de la porcelaine (15°), on a finalement :

$$T' = 1\,290 - 273 - 15 = 1\,002°.$$

La différence entre le résultat de ce calcul et celui de Deville provient de raisons analogues à celles qui ont été signalées plus haut (p. 73, note 1).

Cette méthode est entièrement fautive, car l'iode ne suit pas les lois de Mariotte et de Gay-Lussac. La densité de vapeur de ce corps décroît avec la température, ce que l'on attribue a un dédoublement de la molécule d'iode. Ce fait a été établi par Crafts et Meier et confirmé par M. Troost.

Températures .	445°	850°	1 030°	1 275°	1 390°
Densités. . . .	8,75	8,08	7	5,76	5,30
$\frac{D_t}{D_{445}}$	1	0,92	0,80	0,66	0,60

M. Troost a trouvé 5,70 à la température de 1 240°.

Si dans le calcul précédent, on prend 7,8 pour la densité de l'iode au point d'ébullition du zinc, on trouve

une température plus basse de 150°, qui serait alors beaucoup trop faible.

Méthode de M. Daniel Berthelot. — Toutes les méthodes précédentes sont limitées par l'impossibilité de réaliser des enveloppes solides résistant à des températures supérieures à 1 500°. M. D. Berthelot a imaginé un procédé qui, au moins en théorie, peut être appliqué à des températures aussi élevées que possible, parce qu'il ne suppose pas d'enveloppe au gaz, ou au moins d'enveloppe à la même température Il repose sur la variation d'indice de réfraction d'une masse gazeuse échauffée à pression constante ; la vitesse de la lumière dépend de la nature chimique et de la densité de ce milieu, mais est indépendante de son état physique. Un gaz, un liquide, un solide d'une même nature chimique produisent un retard de la lumière dépendant seulement de la quantité de matière traversée ; cette loi, sensiblement vraie pour des corps quelconques, doit être absolument rigoureuse pour des corps approchant de l'état gazeux parfait. On mesure ce retard par le déplacement des franges d'interférence entre deux faisceaux de lumière parallèles, l'un traversant le gaz chaud, l'autre le gaz froid. En réalité, M. D. Berthelot emploie une méthode de réduction au zéro : il annule le déplacement de la frange en faisant varier à température constante la pression du gaz froid jusqu'à ce que sa densité soit égale à celle du gaz dans la branche chaude qui garde une pression constante.

Appareil. — Une difficulté provient de la nécessité de séparer la lumière en deux faisceaux parallèles, puis de les réunir sans leur donner une différence de marche qui rende les franges invisibles en lumière blanche. On y arrive de la façon suivante (voir fig. 9).

Un rayon lumineux *ab* tombe sur un miroir MM', qui

le dédouble en deux rayons parallèles *bf* et *cd*; pour séparer les faisceaux de manière à pouvoir installer des appareils sur leur parcours, un prisme P donne au rayon *bf* la direction *gh* : on peut ainsi obtenir un écartement de 92 millimètres. Un deuxième prisme P_1 ramène le rayon *cd* suivant *lm*, et après réflexion sur un

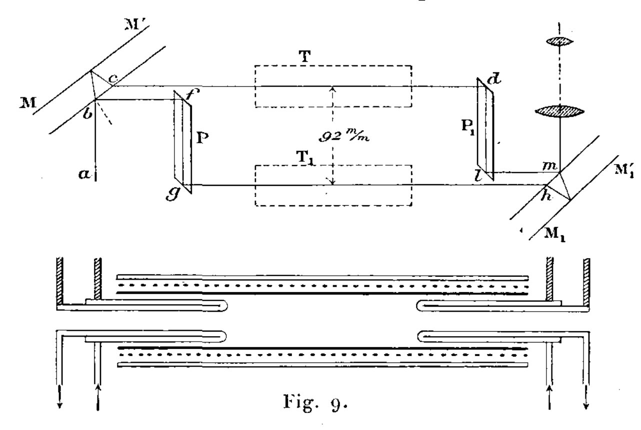


Fig. 9.

deuxième miroir $M_1M'_1$, on observe les franges dans une lunette réglée sur l'infini. Les tubes contenant les gaz sont placés en T et T_1.

Il faut naturellement que les prismes P et P_1 soient parfaitement travaillés. On fait d'abord un premier réglage en lumière jaune, puis on achève en lumière blanche.

Le tube à pression variable est fermé par deux glaces, de même que le tube chaud ; ces quatre glaces doivent être absolument identiques. Le tube chaud est chauffé par un bain de vapeur aux basses températures, par le courant électrique traversant une spirale incandescente aux températures élevées.

Mais une difficulté provient de ce que dans le tube chaud, il existe une région à température variable entre la zone chaude et l'atmosphère froide.

Pour éliminer l'influence de cette zone variable, il y a dans l'intérieur du tube chaud deux tubes à circulation d'eau froide dont on peut faire changer la distance ; on admet que la région variable reste semblable et que la différence de distance entre les deux tubes donne la colonne chaude réellement utilisée. Il en résulte que la longueur comparée de la colonne chaude et de la colonne froide (cette dernière étant constante) ne sont pas les mêmes : la formule à employer sera un peu plus compliquée.

n étant l'indice de réfraction d'un gaz et d sa densité, on a :

$$n - 1 = kd.$$

Dans le tube à pression constante,

$$\frac{d'}{d_0} = \frac{T_0}{T}.$$

et dans le tube à température constante,

$$\frac{d_1}{d_0} = \frac{p}{p_0}.$$

Pour obtenir l'invariabilité des franges, il faut que :

$$(n_1 - n_0)\,L = (n' - n_0)l,$$

L étant la longueur du tube à température constante, et l le déplacement du tube chaud.

$$k\,(d_1 - d_0)\,L = k\,(d' - d_0)l$$

$$L\left(\frac{d_1}{d_0} - 1\right) = l\left(\frac{d'}{d_0} - 1\right)$$

$$L\left(\frac{p}{p_0} - 1\right) = l\left(\frac{T_0}{T} - 1\right)$$

expression qui donne une relation entre les pressions et les températures.

Cette méthode, employée pour le contrôle des points d'ébullition, a donné les résultats suivants qui sont rapprochés des résultats calculés d'après les anciennes expériences de Regnault.

	Pression.	Température observée.	Température calculée.
Alcool.	741mm,5	77°,69	77°,64
Eau.	740mm,1	99°,2	99°,20
—	761mm,04	100°,01	100°,01
Aniline	746mm,48	183°,62	183°,54
—	760mm,91	184°,5	184°,28

M. Berthelot a gradué par le même procédé un couple dont il s'est servi pour déterminer les points de fusion de l'argent, du cuivre, de l'or, et la température d'ébullition du zinc :

Argent.	962°
Or	1064°
Zinc.	910°

Sauf pour le zinc, les nombres trouvés sont identiques à ceux qui résultent des meilleures déterminations faites par d'autres méthodes. La différence observée pour le zinc tient probablement au rayonnement des parois du vase contenant le métal.

Points fixes. — Les points fixes qui seront employés pour la graduation des autres pyromètres doivent être choisis parmi les déterminations de température faites avec le thermomètre à gaz. De celles qui viennent d'être passées en revue, on ne peut guère recommander que les suivants :

Soufre. — (Ebullition) 445° sous la pression de 760 millimètres avec une variation de 0°,095 par changement de

1 millimètre de mercure dans la pression atmosphérique.

Le point d'ébullition du soufre a été l'objet de quatre séries de déterminations distinctes.

Regnault	448
Crafts	445
Callendar	444,5
Chappuis et Harker	445,2

Le nombre de Regnault a été obtenu en plongeant le réservoir du thermomètre dans le soufre liquide; ce liquide a pu se surchauffer et donner un nombre trop fort. Les trois autres déterminations très concordantes ont été obtenues dans la vapeur. Elles conduisent au nombre moyen 445, qui doit être exact à moins de 0°,5 près.

Zinc. — (Ébullition) 930° avec une variation de 0°,15 degré par changement de 1 millimètre dans la pression atmosphérique.

Le point d'ébullition du zinc comme celui du soufre a été l'objet de mesures nombreuses,

E. Becquerel	930° et 890°
H. Saint-Claire-Deville	915 à 945
Barus	926 et 931
Violle	929,6
D. Berthelot	910

Les nombres de Violle et Barus qui semblent mériter le plus de confiance conduisent à adopter le nombre approché 930 qui doit être exact à environ 5° près.

On a laissé de côté dans le tableau ci-dessus les déterminations de H. Sainte-Claire-Deville faites avec la vapeur d'iode et le thermomètre à acide carbonique qui donnent des nombres de 100° plus élevés et certainement beaucoup trop forts.

Or. — (Fusion) 1065.

Les déterminations du point de fusion de l'or également assez nombreuses sont moins concordantes encore que celles du point d'ébullition du zinc.

Pouillet.	1180°
E. Becquerel	1092 et 1037
Violle	1045
Holborn et Wien.	de 1070 à 1075
Heycock et Neville.	1062
D. Berthelot.	1064

Les quatre dernières séries d'expériences semblent *a priori* mériter une confiance égale. Mais la comparaison entre le point de fusion de l'or de M. Violle 1 045 et son point de fusion de l'argent 954 ne donnent qu'un écart de 90°. Or, il est facile au moyen des couples thermo-électriques d'établir d'une façon certaine que l'écart entre ces deux températures est supérieur à 100° tout en différant fort peu. Or, les expériences de M. Violle sur le point de fusion de l'argent sont des deux celles qui méritent le plus de confiance. En les prenant comme point de départ on arriverait à 1060° pour la fusion de l'or.

En se limitant alors aux trois dernières séries, on peut prendre le nombre approché 1065 qui ne doit pas comporter une erreur supérieure à 10°.

Argent. — (Fusion) 962.

Le point de fusion de ce métal est d'un emploi moins avantageux que celui de l'or, en raison de sa volatilité qui ne permet pas de le chauffer au voisinage de fils de platine (couple thermo-électrique) sans les altérer profondément et aussi de son altérabilité plus grande que celle de l'or. Dans les atmosphères réductrices, au contact de matières siliceuses, son point de fusion s'abaisse

notablement par suite vraisemblablement d'une absorption de silicium comme cela arrive avec le platine.

Le point de fusion de l'argent est un de ceux qui a été le plus fréquemment déterminé.

Pouillet	1000°
E. Becquerel	960 et 916
Violle	954
Holborn et Wien	970
Heycock et Neville	960,5
D. Berthelot	962

Les quatre dernières déterminations qui semblent mériter une confiance analogue conduisaient à un chiffre moyen de 962°, qui doit certainement être exact à moins de 10° près, très vraisemblablement même à moins de 5°.

Platine. — 1780.

Le point de fusion du platine a été déterminé deux fois par Violle d'abord, puis par Holborn et Wien. Les résultats n'ont différé que de 1°, c'est-à-dire ont été pratiquement identiques. On ne doit néanmoins considérer cet accord que comme un accident heureux, qui ne peut donner aucune indication sur la précision de la détermination de ce point de fusion. Les mesures expérimentales et surtout les extrapolations indispensables comportent des incertitudes autrement grandes que l'on ne saurait évaluer *à priori*. Une erreur de 25° ne serait pas incompatible avec la précision des mesures faites.

On peut quelquefois se proposer de graduer un pyromètre jusqu'au voisinage de la température ambiante, bien que dans ces cas l'emploi du thermomètre à mercure doive être préféré. On pourra alors employer les deux points d'ébullition de l'eau et de la naphtaline.

Eau, 100° avec une variation de 0°,04 par changement de 1 millimètre dans la pression atmosphérique.

Naphtaline, 218°, avec une variation de 0,06 degré par changement de 1 millimètre dans la pression atmosphérique.

Sels métalliques. — Les différents points fixes qui viennent d'être indiqués ne sont pas tous d'un emploi très commode. Il serait préférable d'avoir, au lieu des métaux, des sels métalliques pour la détermination des points fixes. Ces sels en effet sont la plupart sans action sur le platine, ce qui est un grand avantage pour la graduation des couples thermo-électriques. Il n'y en a pas malheureusement dont les points de fusion aient été déterminés jusqu'ici d'une façon suffisamment précise.

Parmi les plus intéressants à étudier, à ce point de vue on peut citer les suivants :

1 mol. Na Cl + 1 mol. KCl	Vers	650°
Na Cl.	—	800
Na^2 O SO^3.	—	900
Ph^2O^5. $2Na^2O$	—	1000
MgO. SO^3.	—	1150
SiO^2. CaO.	—	1700

Tableaux des points fixes. — Dans l'état actuel les points fixes auxquels on doit donner la préférence sont résumés dans le tableau ci-dessous.

	Ebullition	Fusion
Eau	100°	
Naphtaline	218	
Soufre.	445	
Zinc	930	
Argent.		962°
Or.		1065
Platine.		1780

CHAPITRE IV

PYROMÈTRE CALORIMÉTRIQUE

Principe. — Un poids p d'un corps, porté à une température T, est jeté dans un calorimètre contenant de l'eau à une température t_0. Soit t_1 la température finale commune du corps et de l'eau. P étant le poids en eau des corps en présence (eau, vase calorimétrique, thermomètre, etc.) qui se sont élevés de t_0 à t_1, L_t^T la chaleur d'échauffement de l'unité du poids du corps entre t_1 et T, on a :

$$L_t^T \times p = P\,(t_1 - t_0).$$

Si l'on prend pour origine des températures le zéro du thermomètre centigrade, la chaleur d'échauffement de l'unité de poids du corps à la température T sera :

$$L_t^T = L_{t_1}^T + L_0^t.$$

La quantité L_0^t est facile à calculer, parce que les chaleurs spécifiques à basse température sont suffisamment connues :

$$L_0^t = ct_1.$$

L'expression de la chaleur totale devient :

$$L_0^T = \frac{P\,(t_1 - t_0)}{p} + ct_1.$$

t_1 et t_0 sont données par la lecture directe du thermomètre.

La valeur du second membre est donc entièrement connue, et par suite celle du premier qui lui est égale.

Si des expériences antérieures ont fait reconnaître la valeur de la chaleur d'échauffement L_0^T pour les différentes températures, on pourra de la connaissance de L_0^T arriver à celle de T. Il suffira de tracer une courbe à grande échelle dont les abscisses sont les températures, les ordonnées la chaleur d'échauffement, et de chercher sur cette courbe le point dont l'abscisse a la valeur donnée par l'expérience calorimétrique.

Choix du métal. — Trois métaux ont été proposés : le *platine*, le *fer* et le *nickel.*

Platine. — Ce métal, proposé par Pouillet, a été repris par M. Violle. Il est de beaucoup préférable aux autres métaux ; sa chaleur d'échauffement a été comparée directement aux indications du thermomètre à air ; ce métal peut être reproduit identique à lui-même. L'iridium, que le platine du commerce renferme souvent, a la même chaleur spécifique. Le prix élevé de ces substances est un obstacle à leur emploi courant dans les usines ; il faut au moins, pour un calorimètre d'un litre, une masse de 100 grammes de platine, — soit 500 francs sous un volume de 5 centimètres cubes, — très facile à perdre ou à faire disparaître.

M. Violle a déterminé la chaleur d'échauffement du platine de 0° à 1 200° et l'a calculée par extrapolation jusqu'à 1 800° :

100°	$3^{cal},23$	1 000°	$37^{cal},7$
200	6,58	1 100	42,13
300	9,75	1 200	46,65
400	13,64	1 300	51,35
500	17,35	1 400	56,14
600	21,18	1 500	61,05
700	25,13	1 600	66,08
800	29,20	1 700	71,23
900	33,39	1 800	76,50

Fer. — Regnault, dans une étude faite pour la Compagnie Parisienne du gaz, avait proposé et fait adopter le fer, en lui attribuant une chaleur spécifique de 0,126, tandis qu'elle est à 0° de 0,106. Il employait un cube de 7 centimètres de côté qui était introduit dans les fours à l'aide de longues barres de fer. Le calorimètre était en bois, et d'une contenance de 4 litres.

Différents expérimentateurs ont déterminé la chaleur d'échauffement du fer ; aux températures élevées la concordance n'est pas parfaite entre les résultats.

TEMPÉRATURE	POST	PIONCHON	EUCHÈNE	CHALEUR spécifique constante.
degrés.	calories.	calories.	calories.	calories.
100	10,8	11,0	11,0	10,8
200	22,0	22,5	23,0	21,5
300	35,0	36,5	37,0	32,5
400	39,5	41,5	42,0	43,0
500	67,5	68,5	69,5	54,0
600	86,0	87,5	84,0	65,0
700	108,0	111,5	106,0	76,0
800	132,0	137,0	131,0	87,0
900	157,0	157,5	151,5	98,0
1 000	187,5	179,0	173,0	109,0

Mais ce métal ne convient aucunement pour un pareil usage, en raison d'abord de sa grande oxydabilité. Il se forme à chaque chauffage une croûte d'oxyde qui se détache par l'immersion dans l'eau, de sorte que le poids du métal varie d'une opération à l'autre. En outre le fer, surtout quand il renferme du carbone, présente des changements d'état accompagnés pendant le chauffage d'une grande absorption de chaleur latente. Au refroidissement dans l'eau il se produit une trempe qui peut irrégulièrement empêcher les transformations inverses.

Nickel. — Au Congrès de l'Industrie du gaz de 1889,

M. H. Le Chatelier a proposé le nickel, qui est peu oxydable jusqu'à 100° et qui, au-dessus de 400°, ne présente pas de changement d'états comme le fer.

La chaleur d'échauffement du nickel a été déterminée par M. Pionchon, d'une part; par MM. Euchêne et Biju-Duval, d'autre part.

TEMPÉRATURE	PIONCHON	EUCHÊNE
degrés.	calories.	calories.
100	11,0	12,0
200	22,5	24,0
300	42,0	37,0
400	52,0	50,0
500	65,5	63,5
600	78,5	75,0
700	92,5	90,0
800	107,0	103,0
900	123,0	117,5
1 000	138,5	134,0

Les écarts observés tiennent très probablement en partie aux impuretés que peut contenir le nickel.

Calorimètres. — 1° Dans les laboratoires, on emploie avec la masse de platine le calorimètre de M. Berthelot dont on trouvera la description dans les *Annales de chimie et de physique*[1] (fig. 10). Les thermomètres employés pour mesurer l'élévation de température doivent être très sensibles, pour que l'on puisse se contenter d'une élévation de 2 à 4°, de façon à rendre négligeable la correction du refroidissement. Si l'on emploie, par exemple, un thermomètre donnant le centième de degré, la masse de platine devra être environ la vingtième partie de la masse de l'eau du calorimètre.

(1) 4e série, t. XXIX, p. 109. — 5e série : t. V, p. 5; t. X, p. 433 et 447; t. XII, p. 550.

2° Dans l'industrie, où les mesures sont faites avec une moindre précision, et où il faut tenir compte des frais d'installation des appareils, on emploiera du nickel, un thermomètre au dixième de degré et un calorimètre en zinc qui peut être fait sur place. Une installation semblable peut revenir à une vingtaine de francs. On emploiera une masse de nickel égale à la vingtième partie du poids de l'eau du calorimètre.

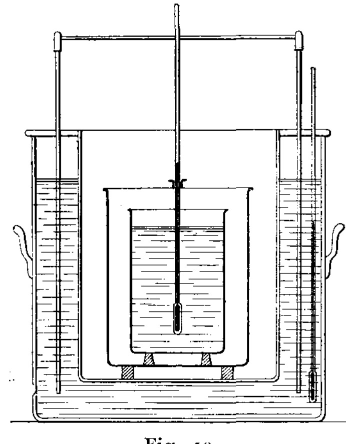


Fig. 10.

Les calorimètres employés à la Compagnie Parisienne du gaz dérivent du calorimètre de M. Berthelot. Ce sont également des calorimètres à enveloppe d'eau. Il en existe deux modèles.

Calorimètres à enveloppe d'eau (fig. 11 et 12). — Ces

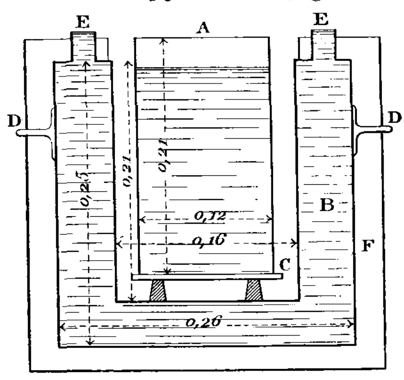


Fig. 11.

A, vase cylindrique en cuivre mince ; B, enveloppe remplie d'eau ; C, support en bois ; D, poignées ; E, tubulures de remplissage ; F, garniture en feutre.

appareils comprennent un calorimètre cylindrique de la

contenance de deux litres, en zinc ou en cuivre ; une double enveloppe cylindrique du même métal contenant de l'eau et entourée de feutre à l'extérieur. Le calorimètre repose sur cette enveloppe au moyen d'un support

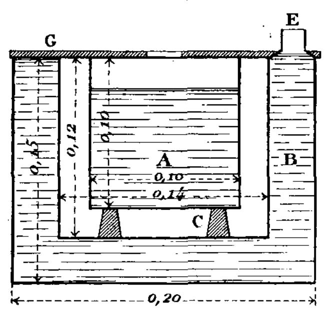


Fig. 12.

A, vase en zinc ; B, enveloppe pleine d'eau ; C, supports en liège ; E, tubulure de remplissage ; G, couvercle en carton.

en bois. Un thermomètre au 1/5e de degré à petit réservoir de mercure et d'une assez grande longueur, sert d'agitateur. Le corps thermométrique est un index de

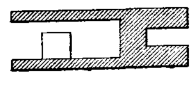


Fig. 13.

nickel d'un poids égal au 1/10e du poids de l'eau, soit 200 grammes, de manière à avoir des écarts de températures importants et faciles à apprécier par les ouvriers qui font les mesures.

En règle générale, il faut éviter de placer le corps thermométrique sur la sole du four. L'index de nickel qui est pris sous la forme de petits cylindres ayant de 15 à 25 millimètres de diamètre et de 10 à 30 millimètres de hauteur repose pour l'isoler de la sole dans un creuset de nickel muni d'un pied et de deux pattes fixées un peu au-dessus du centre de gravité. Quand il

a été chauffé pendant une demi-heure, un opérateur retire le creuset avec une tringle à fourche, et un autre opérateur saisit ce creuset avec une pince pour le renverser dans le calorimètre.

On n'emploie pas de creuset en fer, parce que ce métal s'oxyde et laisse détacher des paillettes qui, en tombant dans l'eau du calorimètre, fausseraient l'essai. Au lieu d'un creuset en nickel on peut employer des pièces en terre réfractaire de la forme ci-dessus (fig. 13).

Précision des mesures. — M. Biju-Duval a fait une série d'expériences pour se rendre compte des causes d'erreurs que comportait l'emploi du calorimètre en comparant ses indications à celles du pyromètre thermo-électrique de M. Le Chatelier. Les expériences ont été faites en faisant varier les conditions suivantes.

Emploi du thermomètre au 1/5e ou au 1/50e de degré.

Emploi du vieux calorimètre en bois des usines ou du calorimètre à enveloppe d'eau

Emploi du fer ou du nickel.

I. *Expérience.* — Ancien calorimètre en bois des usines. Fer. Thermomètre au 1/5e de degré.

$$P = 10\,000^{gr}$$
$$p = 1\,031^{gr}$$
$$t_0 = 20°,8$$
$$t_1 = 36°,2$$
$$Q_0^t = 153^{cal.}5$$

Température calculée :

Chaleur spécifique constante du fer. .	$= 0,108$	$t = 1\,420°$
— — —	$= 0,126$	$= 1\,210°$
Chaleur d'échauffement d'après Biju-Duval. . .		$= 915°$
Pyromètre thermo-électrique		$970°$

On voit donc que les chaleurs spécifiques constantes

même avec la correction proposée par Regnault donnent des températures tout à fait exagérées. Avec la courbe des chaleurs d'échauffement la température trouvée est trop basse à cause des pertes de chaleur suivantes :

1° Absorption de chaleur par les parois en bois ;

2° Rayonnement du cube de fer pendant le transfert ;

3° Refroidissement de l'eau du calorimètre dont la température dépasse de 16° la température ambiante.

Les expériences suivantes ont été faites avec le thermomètre au 1/50e de degré ; l'index de nickel est protégé contre le rayonnement par un creuset. On a comparé les deux calorimètres.

II. *Essai avec le calorimètre en bois.*

$T = 975°$ au pyromètre thermo-électrique.
$P = 10\,000$ grammes.
$p = 145$ —
$t_0 = 20°,21$
$t_1 = 21°,99$
$L_0^T = 125$ calories.
$L_0^T = 130$ calories d'après le tracé graphique à 975°.

La différence est 5 calories, soit 4 p. 100 de perte due à l'enveloppe.

III. *Essai avec le calorimètre à enveloppe d'eau.*

$T = 985°$
$P = 2\,000$ grammes.
$p = 48^{gr},4$
$t_0 = 18°,86$
$t_1 = 21°,95$
$L_0^T = 130$ calories.
$L_0^T = 131^{cal.},5$ d'après le tracé graphique à 985°.

La différence est $1^{cal},5$, soit une perte de 1,11 p. 100

seulement quand on emploie un calorimètre soigné et un thermomètre au 1/50e de degré. Ce qui correspond à une incertitude de moins de 10° sur les températures. Avec le thermomètre au 1/10e de degré qui nécessite une plus forte élévation de l'eau du calorimètre, il faudra compter sur une incertitude de 25°.

Conditions d'emploi. — Les avantages du pyromètre calorimétrique sont :

1° Son bas prix de revient;

2° La facilité de son emploi qui permet de le mettre entre les mains d'un ouvrier.

Les inconvénients sont :

1° Le temps nécessaire pour une mesure, une demi-heure environ ;

2° L'impossibilité de faire des observations continues ;

3° L'impossibilité de dépasser 1000° avec l'emploi de l'index en nickel.

Son emploi ne semble pas devoir être recommandé pour les laboratoires.

Il doit être recommandé pour les usines dans les cas où l'on ne se propose de faire des mesures que d'une façon accidentelle; lorsque l'on ne dispose pas d'un personnel assez expérimenté pour employer des méthodes plus précises ; et enfin quand l'importance des mesures n'est pas telle qu'elle puisse justifier l'achat d'instruments plus coûteux.

CHAPITRE V

PYROMÈTRE A RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Principe. — Dans cet appareil, on utilise les variations de la résistance électrique d'un fil de platine en fonction de la température ; ces variations sont de l'ordre de grandeur de celles de la dilatation des gaz. Le rapport des résistances est 1,34 à 100° et 4 à 1.000°. Comme les résistances électriques se mesurent avec une grande précision, ce procédé d'estimation des températures présente une très grande sensibilité, et il pourra donner de très bonnes mesures quand on connaîtra exactement la loi qui relie les variations de résistance aux variations de température.

Le pyromètre électrique fut proposé par Siemens en 1871 (*Backerian lecture*) ; il se répandit rapidement dans les usines métallurgiques à cause de la notoriété du nom de son inventeur, mais il fut bientôt abandonné pour des raisons qui seront données plus loin.

Recherches de Siemens. — Le pyromètre de Siemens est constitué par un fil fin de platine de 1 mètre de long et $0^{mm},1$ de diamètre, enroulé sur un cylindre de porcelaine ou de terre cuite ; le tout est enfermé dans un tube de fer, destiné à protéger l'ensemble contre l'action des flammes.

Siemens essaya aussi, mais sans succès, des matières

céramiques imprégnées de métaux de la famille du platine.

Pour mesurer la résistance, il employa, soit un galvanomètre pour les expériences de laboratoire, soit un voltamètre pour les mesures d'usine. Dans ce dernier cas, le courant d'une pile se partage entre la résistance chauffée et une résistance étalon à température constante ; dans chacun des circuits, se trouve interposé un voltamètre : le rapport de volumes gazeux dégagés donne le rapport des intensités, et par suite le rapport inverse des résistances.

Enfin Siemens donna une formule à trois termes reliant la résistance électrique du platine aux températures du thermomètre à air, mais sans publier les données expérimentales qui servirent de base à cette graduation.

L'expérience montra bientôt que l'appareil ne reste pas comparable à lui-même. Une commission de l'*Association britannique pour l'avancement des sciences* reconnut que la résistance du platine augmente après chaque chauffage. Il faudrait alors graduer l'appareil toutes les fois qu'il sert. Ce changement de résistance est dù à une altération chimique du platine qui est énorme quand on le chauffe directement dans la flamme, moindre, mais très notable encore si on le place dans un tube de fer, qui devient nulle quand on emploie un tube de platine ou de porcelaine. Cette augmentation de résistance peut atteindre 15 p. 100 par des chauffages répétés jusqu'à 900°.

Le platine étant très cher et la porcelaine très fragile, il était impossible d'employer ces deux corps dans l'industrie qui, seule, se préoccupait alors des mesures de températures élevées, et cette méthode fut abandonnée complètement pendant vingt ans.

Recherches de MM. Callendar et Griffiths. — Ces savants ont repris récemment cette méthode en vue des recherches de laboratoire ; elle semble la meilleure pour les travaux de précision, à condition de s'assurer l'invariabilité de la résistance du platine.

M. Callendar reconnut que l'argile intervient dans son altération, que le fil de platine devient cassant par place et se colle au support ; cette action est probablement due aux impuretés de l'argile. Avec le mica, au contraire, que le fil ne touche que par la tranche (le support est constitué par deux lames de mica perpendiculaires), on a un isolement parfait sans cause d'altération ; mais le mica se déshydrate à 800° et devient alors très fragile.

Toutes les *soudures métalliques* doivent être proscrites, car elles sont volatiles et attaquent le platine.

Les joints à pression (vis ou torsion) sont également mauvais, car ils se desserrent. On ne doit employer que la *soudure autogène* par fusion du platine.

On doit également rejeter les conducteurs en cuivre, au moins dans la partie chauffée en raison de la volatilité du métal ; un pyromètre à conducteurs semblables, chauffé pendant une heure à 850°, a présenté un accroissement de résistance de 1/3 p. 100.

Recherches de MM. Holborn et Wien. — Ces savants ont fait une étude très complète de cette altérabilité des fils de platine, dans une comparaison entre les méthodes de mesures de températures par la résistance électrique et par les forces thermo-électriques ; ils ont opéré sur des fils de $0^{mm},1$ à $0^{mm},3$. Ils ont d'abord reconnu qu'au-dessus de 1 200°, le platine commence à éprouver une volatilisation faible qui suffit à augmenter notablement la résistance des fils très fins. L'hydrogène, en

présence de matières silicieuses, provoque à partir de 850° une altération rapide du platine.

Voici des résultats relatifs à des fils de $0^{mm},3$ d'une longueur de 160 millimètres.

Fil α au début.	R à 15° $0^{ohm},239$.	Fil β au début.	R à 15° $0^{ohm},247$.
Après chauffage au rouge :		Après plusieurs jours	
2 fois dans l'air à 1 200°	0,238	dans l'hydrogène à 15° :	0,246
2 — le vide —	0,240	Après chauffage dans	
1 — hydrogène —	0,262	l'hydrogène à 1 200° :	0,255
1 — le vide —	0,253		

Fil γ au début :	R à 15° $0^{ohm},183$.
Après chauffage dans l'air à 1 250° (3 fois) :	0,182
Après chauffage dans l'hydrogène à 1 250° :	0,188
Après chauffage dans l'hydrogène à 1 250° :	0,195

Le fil γ chauffé à 1 350° dans un tube en terre et dans l'hydrogène est devenu cassant; ce résultat doit s'expliquer par une siliciuration du platine, car on n'observe rien si le fil est chauffé par le courant électrique au milieu d'un tube de verre froid, même dans l'hydrogène.

Des expériences analogues ont été faites par les mêmes auteurs sur le palladium, le rhodium et l'iridium.

Avec le *palladium*, l'absorption de l'hydrogène à basse température qui donne l'hydrure augmente la résistance de 60 p. 100 ; on constate en outre le même effet d'altération qu'avec le platine, si on place le palladium dans l'hydrogène en présence de silice.

Il n'y a aucune conclusion bien nette à tirer des expériences sur le *rhodium et l'iridium*, sinon que ces métaux ne prennent leur résistance normale qu'après avoir été chauffés plusieurs fois à une température élevée.

Loi de variation de la résistance du platine. — MM. Callendar et Griffiths ont comparé la résistance du platine au thermomètre à air jusqu'à 550°; ils ont trouvé que jusqu'à 500°, la relation peut être représentée à moins de 0°,1 par une formule parabolique à 3 paramètres. Pour graduer un semblable pyromètre, il suffirait donc de trois points fixes : glace, eau, soufre.

Ils ont donné à la relation une forme spéciale; soit p_t la température électrique définie par la relation,

$$p_t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} . 100$$

c'est-à-dire la valeur de la température dans le cas où la résistance varierait proportionnellement à la température.

Ils posent alors

$$t - p_t = \delta \left[- \frac{t}{100} + \left(\frac{t}{100} \right)^2 \right]$$

Il semblerait que cette formule ne contient qu'un paramètre δ; mais en réalité p_t en renferme deux.

En remplaçant p_t par sa valeur, il vient :

$$R_t = R_0 t + \frac{(1 + \delta)(R_{100} - R_0)}{(100)^2} t - \delta \frac{R_{100} - R_0}{(100)^3} t^2,$$

équation de la forme :

$$R_t = a + bt + ct^2$$

Cette forme compliquée est sans intérêt. MM. Callendar et Griffiths ont employé leur pyromètre avant de l'avoir étalonné avec le thermomètre à air. Ne pouvant calculer t, ils ont provisoirement calculé les températures approchées p_t, et ultérieurement ils ont déter-

miné la correction entre t et p_t, par suite cherché la formule exprimant la différence entre ces deux grandeurs. En extrapolant cette formule jusqu'à 1 000°, on a trouvé des points de fusion de l'or et de l'argent assez voisins de ceux déterminés par d'autres expérimentateurs.

MM. Holborn et Wien ont montré cependant qu'à température élevée, la formule d'interpolation est certainement inexacte. La résistance semble devenir asymptote à une droite, tandis que la formule conduit à un maximum évidemment inacceptable ; elle serait sans doute mieux représentée par une expression de la forme

$$Rt = a + b\,(t + 273)^{c}$$

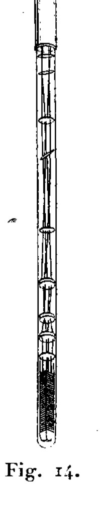
Voici les résultats de quelques expériences faites sur un même fil par ces deux savants :

t	R	t	R
degrés.	ohms.	degrés.	ohms.
0	0,0355	0	0,0356
1 045	0,1510	1 040	0,1487
1 193	0,1595	1 144	0,1574
1 303	0,1699	1 328	0,1720
1 395	0,1787	1 425	0,1802
1 513	0.1877	1 550	0,1908
1 578	0,1933	1 610	0,1962

Ce fil ayant été au contact des gaz du foyer par suite de la rupture du tube s'est rompu. Un autre fil a donné les résultats suivants :

t	R
567	0ohm,0972
772	1164
1 045	1408
1 185	1511
1 263	1573

Dispositif expérimental (fig. 14). — Dans le pyromètre de M. Callandar le fil de platine est enroulé sur deux lames de mica disposées en croix.


Fig. 14.

Trois gros fils de platine servent à l'arrivée et à la sortie du courant ; l'un d'eux est destiné à compenser l'influence de la température sur le conducteur parallèle.

Dans les laboratoires, la mesure des résistances est faite par le pont de Wheatstone (fig. 15). On emploie une boîte de résistance munie en outre d'un rhéostat constitué par un fil de platine tendu destiné à mesurer les petites fractions de résistance.

Dans les usines, on se sert d'un appareil (fig. 15 *bis*) composé d'un galvanomètre à aiguille et d'une boîte de résistance de forme circulaire, composée de 15 bobines de 1 ohm. On lit la déviation correspondant à deux bornes successives, et par interpolation, on a la valeur réelle de la résistance. L'approximation ainsi obtenue est suffisante.

Le pyromètre doit pour éviter les ruptures être installé à l'avance dans le four froid, ou chauffé au préalable dans un moufle si on est obligé de l'introduire dans le four chaud. Il faut avoir soin de chauffer le tube de porcelaine sur une longueur assez grande pour

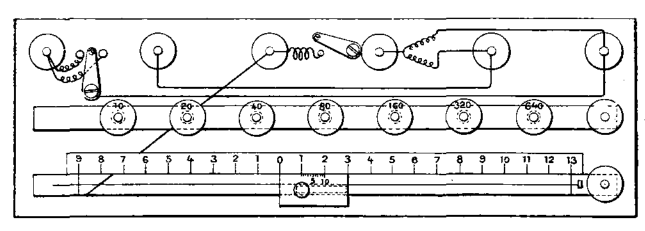


Fig. 15.

éviter l'effet de la conductibilité intérieure qui empê-

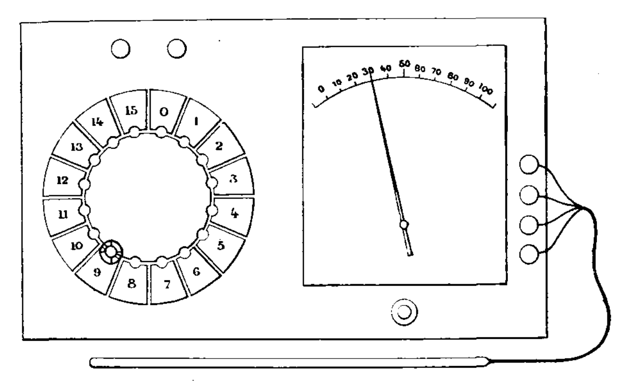


Fig. 15 *bis*.

cherait la spirale de prendre la température du milieu ambiant.

MM. Callendar et Griffiths ont déterminé un certain nombre de points de fusion et d'ébullition.

Fusion.		Ébullition sous 760mm.	
Étain.	232°	Aniline	184°,1
Bismuth	270	Naphtaline. . . .	217 ,8
Cadmium.	322	Benzophénone. .	305 ,8
Plomb	329	Mercure.	356 ,7
Zinc	421	Soufre	444 ,5

Ces résultats sont à rapprocher des déterminations antérieures de M. Crafts faites avec le thermomètre à air :

NAPHTALINE		BENZOPHÉNONE	
p	t	p	t
millimètres.	degrés.	millimètres.	degrés.
730,3	216,3	730,9	304,2
740,3	216,9	740,1	304,8
750,5	217,5	750,9	305,5
760,7	218	760,3	306,1

Regnault avait trouvé pour le mercure :

$t = 350°$	sous la pression de	. . . .	663mm
$t = 360$	— —	. . . .	797,7
$t = 370$	— —	. . . .	954,6

MM. Heycock et Neville ont appliqué la méthode précédemment décrite, en prolongeant la graduation par extrapolation, à la détermination des points de fusion de quelques métaux et sels.

Métaux.	Étain	232°	
	Zinc.	419	
	Magnésium (1 p. 100 d'impuretés). .	633	
	Antimoine	629,5	
	Aluminium (0,5 p. 100 d'impuretés).	654,5	
	Argent.	960,5	
	Or.	1 062	
	Cuivre.	1 080,5	
Sels . .	Sulfate de potasse	1 084°	(fusion).
		1 067	(solidification).
	Sulfate de soude.	902	(fusion).
		883	(solidification).
	Carbonate de soude	850	

L'écart trouvé entre les points de fusion et de solidification du sulfate de potasse s'explique par l'existence d'un point de transformation dimorphique au voisinage du point de fusion. C'est un cas analogue à celui du soufre ; on observe suivant les cas les points de fusion ou solidification de l'une ou l'autre des variétés dimorphiques. Il en est sans doute de même pour le sulfate de soude.

Conditions d'emploi . — Le pyromètre à résistance électrique semble, en raison de la grande précision des mesures qu'il comporte, convenir tout particulièrement pour les recherches de laboratoire. Il semble au con-

traire trop fragile pour la plupart des applications industrielles.

En tout cas, avant de pouvoir l'employer utilement aux températures élevées, il faudra que la graduation de la résistance de platine, faite jusqu'à 600° seulement d'une façon un peu précise, soit poussée plus loin.

CHAPITRE VI

PYROMÈTRE THERMO-ÉLECTRIQUE

Principe. — La soudure de deux métaux chauffés à une température donnée est le siège d'une force électromotrice qui n'est fonction que de la température seule, au moins dans certaines conditions qui seront définies plus loin. Dans un circuit renfermant plusieurs soudures différentes à des températures différentes, la force électromotrice totale est égale à leur somme algébrique. Dans un circuit fermé, il se produit un courant égal au quotient de cette force électromotrice résultante par la résistance totale.

C'est Becquerel qui, le premier, eût l'idée de profiter de la découverte de Seebeck pour la mesure des hautes températures (1830). Il employa un couple platine-palladium, et estima la température de la flamme d'une lampe à alcool qu'il trouva égale à 135°. En réalité, la température d'un fil chauffé dans la flamme n'est pas celle des gaz en combustion ; elle lui est inférieure.

La méthode fut étudiée et employée pour la première fois, d'une façon systématique, par Pouillet ; il utilisa un couple fer-platine qu'il gradua avec le thermomètre à air précédemment décrit (p. 59). Pour protéger le platine contre l'action des gaz du foyer, il l'enferma dans un canon de fusil en fer qui constituait le second

métal de la soudure. Pouillet ne sembla pas avoir fait d'applications de cette méthode, qui a dù lui donner des résultats très discordants.

Edm. Becquerel reprit l'étude du couple de son père (platine-palladium). Il signala le premier l'importance capitale d'employer dans ces mesures un galvanomètre à grande résistance. C'est la force électromotrice qui est fonction de la température, et c'est une intensité de courant que l'on mesure. La loi d'Ohm donne

$$E = RI.$$

Pour qu'il y ait proportionnalité entre ces grandeurs, il faut que la résistance du circuit soit invariable. Celle du couple varie nécessairement quand on le chauffe ; il faut qu'elle soit négligeable vis-à-vis de celle du reste du circuit.

Edm. Becquerel étudia le couple platine-palladium et s'en servit comme intermédiaire dans toutes ses mesures de points de fusion, mais il ne l'employa pas à proprement parler comme pyromètre ; il le comparait, au moment de s'en servir, avec un thermomètre à air chauffé à une température voisine de celle qu'il voulait mesurer. Il chercha également à faire une graduation complète de ce couple, mais cette tentative ne fut pas heureuse : il ne se rendit pas compte des irrégularités dues à l'emploi du palladium ; d'autre part, il se servit successivement pour cette graduation d'un thermomètre à mercure et d'un thermomètre à air qui ne concordaient pas entre eux. Il fut conduit à attribuer à la relation entre la force électromotrice et la température une forme très complexe; les formules qu'il donne comportaient ensemble douze paramètres, alors qu'il en suffit de deux avec la formule parabolique de Tait et Avénarius,

$$e = a + b(t - t_0) + c\,(t^2 - t_0^2)$$

qui représente bien le phénomène pour le couple en question jusqu'à 1 500°.

Regnault reprit l'étude du couple de Pouillet, et il observa de telles irrégularités qu'il condamna sans réserve la méthode thermo-électrique. Mais ses expériences sont peu concluantes, car il ne semble pas s'être préoccupé d'employer un galvanomètre à grande résistance.

Expériences de M. Le Chatelier. — La méthode thermo-électrique présente cependant des avantages pratiques considérables, aussi bien pour le laboratoire que pour l'industrie :

Petitesse du corps thermométrique,

Rapidité des indications,

Possibilité de placer à toute distance les appareils de mesure.

Aussi M. H. Le Chatelier crut-il devoir en reprendre l'étude, se proposant au début, non de faire disparaître des irrégularités qui semblaient inhérentes au phénomène mis en œuvre, mais d'étudier la loi de ces irrégularités, de façon à faire des corrections qui permettent au moins d'utiliser industriellement cette méthode pour des mesures approximatives Ces recherches montrèrent de suite que les causes d'erreurs observées pouvaient être supprimées ; la principale, la seule grave, provenait du manque d'homogénéité des métaux employés jusque-là.

Le fer, le palladium, le nickel et leurs alliages sont absolument impropres aux mesures des températures élevées, parce que, chauffés en certains de leurs points, ils donnent naissance à des courants parasites, parfois relativement intenses.

Hétérogénéité des fils — Voici, par exemple, les

forces électromotrices observées en promenant un bec Bunsen sous un fil de ferronickel de 1 millimètre de diamètre et 50 centimètres de longueur; les forces électromotrices sont exprimées en microvolts (millioniémes de volt).

Distance.	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,35	0,40	0,50
F.e.m.	— 200	+ 250	— 150	— 1000	— 500	— 200	— 50	— 200

La force électromotrice de 1 000 microvolts est celle que donnent les couples usuels que nous allons étudier pour un échauffement de 100°. Avec de semblables anomalies, il n'y aurait donc pas de mesures possibles.

Ces anomalies peuvent tenir parfois à des variations accidentelles dans la composition des fils, mais en général il n'y a aucune hétérogénéité préexistante; on est en présence d'une hétérogénéité physique due au chauffage. Le fer et le nickel, chauffés respectivement à 750° et 380°, éprouvent une transformation allotropique, incomplètement réversible par un refroidissement rapide.

Dans le cas du palladium, il se produit en outre des phénomènes d'hydrogénation qui changent totalement la nature du métal, de sorte qu'un métal initialement homogène peut devenir par le simple chauffage tout à fait hétérogène et constituer un couple.

Certains métaux et alliages sont absolument exempts de ces défauts, notamment le platine et ses alliages avec l'iridium et le rhodium. Les irrégularités observées antérieurement tenaient donc à l'emploi du fer et du palladium dans tous les couples essayés.

Une seconde cause d'erreur, moins importante, provient de l'écrouissage. En chauffant sur un fil le point de passage de la partie écrouie à la partie recuite, il se développe un courant dont l'intensité est variable

avec la nature du fil et le degré d'écrouissage. Les torsions que l'on fait subir en un point à un fil suffisent pour provoquer un écrouissage. Un couple dont les fils sont écrouis sur une certaine longueur donnera des indications différentes suivant le point du fil où le chauffage s'arrête. Voici les résultats obtenus en microvolts avec un couple platine, platine iridié à 20 p. 100 (le platine iridié est très écrouissable).

	100°	445°
Avant recuit	1 100	7 200
Après recuit	1 300	7 800
Différence	200	600

Nous allons étudier successivement :

1° Le choix du couple ;

2° Le choix des procédés de mesure électrique ;

3° Les causes d'erreur ;

4° La graduation.

Choix du couple. — Il faut faire entrer en ligne de compte la force électromotrice, l'absence des courants parasites, l'inaltérabilité des métaux employés.

a. *Force électromotrice.* — Elle varie énormément d'un couple à l'autre. Voici quelques forces électromotrices semblables données entre 0° et 100° par des métaux pouvant se tirer en fils et opposés à du platine pur.

	Microvolts.
Fer	2 100
Acier dur	1 800
Argent	900
Cu + 10 p. 100 Al	700
Or	600
Pt + 10 p. 100 Rh Pt + 10 p. 100 Ir	500
Cu + Ag	500
Ferronickel	100
Acier au nickel (5 p. 100)	0

	Microvolts.
Acier au Mn (13 p. 100)	— 300
Cu + 20 p. 100 Ni	— 600
Cu — Fe — Ni	— 1 200
Maillechort (15 p. 100 Ni)	— 1 200
— (25 p. 100 Ni)	— 2 200
Nickel	— 2 200
Acier au nickel (35 p. 100)	— 2 700
— (75 p. 100)	— 3 700

M. C. Barus (1) a étudié certains alliages de platine entre 0° et 930° ; il a obtenu les résultats suivants :

	Microvolts.
Iridium (2 p. 100)	791
— (5 —)	2830
— (10 —)	5700
— (15 —)	7900
— (20 —)	9300
Palladium (3 p. 100)	982
— (10 —)	9300
Nickel (2 p. 100)	3744
— (5 —)	7121

Voici une autre série faite au point d'ébullition du soufre avec des alliages de platine contenant 2, 5 et 10 p. 100 d'un autre métal.

MÉTAL	Au	Ag	Pd	Ir	Cu
2 p. 100	— 242	— 18	+ 711	+ 1 384	+ 410
5 —	— 832	— 105	+ 869	+ 2 035	+ 392
10 —	— 1 225	— 158	+ 1 127	+ 3 228	+ 257
	Ni	**Co**	**Fe**	**Cr**	**Sn**
2 p. 100	+ 2 166	+ 26	+ 3 020	+ 2 239	+ 261
5 —	+ 3 990	— 170	+ 3 313	+ 3 123	+ 199
10 —	+ 5 095	— 41	+ 3 962	+ 3 583	+ 151

(1) M. Barus a étudié en même temps que M. Le Chatelier, la mesure thermo-électrique des températures élevées ; il se proposait de déterminer les

MÉTAL	Al	Mn	Mo	Pb	Sb	Bi	Zn
2 p. 100. .	+ 779	+ 758	+ 263	— 268	+ 1 155	+ 245	+ 396
5 — . .	+ 938	+ 2 206	+ 1 673	+ 338	»	»	+ 24
10 — . .	»	»	+ 766	»	»	»	»

De tous ces métaux, les seuls à retenir en raison de leur force électromotrice élevée sont les alliages du platine avec le fer, le nickel, le chrome, l'iridium et le rhodium. Le tableau suivant donne, en microvolts, les forces électromotrices des alliages à 10 p. 100 de ces cinq métaux jusqu'à la température de 1 500°.

TEMPÉRATURES	Fe	Ni	Cr	Ir	Ph
degrés.					
100	438	646	405	517	565
448	3 962	4 095	3 583	3 228	3 450
930	9 200	9 100	»	11 000	8 500
1 500	19 900	20 200	»	»	15 100

b. *Absence de courants parasites.* — L'alliage avec le nickel donne des courants parasites extrêmement intenses comme tous les alliages de ce métal. Il en serait probablement de même avec le fer, mais il n'a pas été fait d'expériences. Le chrome semble ne pas présenter le même inconvénient, mais c'est un alliage très peu fusible, et pour ce motif, difficile à préparer. Avec les alliages d'iridium et de rhodium, il n'y a production d'aucun courant parasite.

Il ne reste donc plus que trois métaux à conserver :

---

températures de formation des roches de l'écorce terrestre; ses recherches considérables sont peu connues. On trouve dans son travail un grand nombre des données numériques dont il sera fait usage ici.

l'iridium, le rhodium et le chrome. Des alliages de ces trois métaux avec le platine, celui d'iridium est celui qui s'écrouit le plus facilement.

c. *Altération chimique.* — Tous ces alliages du platine sont peu altérables. Ceux de nickel et de fer, aux températures élevées, prennent une légère teinte brune superficielle par suite de l'oxydation du métal. Il n'a pas été fait d'expériences pour savoir si, à la longue, cette attaque atteindrait l'intérieur même des fils.

Les alliages du platine, et le platine lui-même, deviennent cassants par le seul fait d'un chauffage prolongé, surtout entre 1 000° et 1 200° ; cela provient sans doute d'une cristallisation. L'alliage platine-iridium éprouve cette altération beaucoup plus vite que l'alliage platine-rhodium, et ce dernier plus rapidement que le platine pur.

Mais une cause bien plus grave d'altération du platine et de ses alliages est le chauffage aux températures élevées en *atmosphère réductrice.*

Tous les métaux volatils attaquent très rapidement le platine et un grand nombre de métaux sont volatils. Le cuivre, le zinc, l'argent, l'antimoine, à leur point de fusion, émettent déjà une quantité suffisante de vapeur pour altérer rapidement des fils de platine placés dans leur voisinage. Ces vapeurs métalliques, sauf celle d'argent, ne peuvent subsister que dans une atmosphère réductrice. Parmi les métalloïdes, les vapeurs de phosphore et de certains composés du silicium sont particulièrement dangereuses. Il est vrai que l'on a rarement affaire à ces métalloïdes non combinés, mais leurs oxydes en présence d'une atmosphère réductrice sont plus ou moins complètement réduits. Pour le phosphore il faut se méfier non seulement de l'acide phos-

phorique, mais encore des phosphates acides de tous les métaux et des phosphates basiques des oxydes réductibles; pour le silicium, de la silice et de presque tous les silicates, y compris l'argile.

Les flammes réductrices dans un fourneau en terre réfractaire amènent peu à peu la destruction des fils de platine. Il est donc indispensable de protéger les couples contre toute atmosphère réductrice par des procédés qui seront plus loin passés en revue.

En tenant compte de ces différentes considérations : force électromotrice, homogénéité, écrouissage, altérabilité au feu, on est conduit à donner la préférence au couple Pt — Pt + 10 p. 100 Rh. avec possibilité de remplacer le rhodium par l'iridium, et peut-être par le chrome. Dans le cas de l'iridium il faut se rappeler que le recuit préalable des fils est très important, et que le chauffage prolongé vers 1 100°, même en atmosphère oxydante, est dangereuse pour le couple.

Procédés de mesures électriques. — Deux procédés peuvent être employés pour mesurer la force électromotrice d'un couple : la méthode par opposition et la méthode galvanométrique. Au point de vue scientifique, la première seule est rigoureuse ; on l'utilise parfois dans les laboratoires. La deuxième méthode est plus simple, mais elle a l'inconvénient de ne donner qu'indirectement la mesure de la force électromotrice en passant par une mesure d'intensité.

Méthode par opposition. — Une installation complète comprend :

1° Une *pile étalon* qui ne doit être traversée par aucun courant et sert à régler, comme terme de comparaison, une différence de potentiel entre deux points d'un circuit parcouru par un courant produit par un accumulateur.

La pile employée est l'élément Latimer-Clarke dont la force électromotrice est

$$e = 1^{\text{volt}},438 - 0,0012\,(t^0 - 15^0).$$

Cette pile est ainsi constituée : zinc, sulfate de zinc, sulfate mercureux, mercure. Le sulfate de zinc doit être parfaitement neutre ; pour cela, on chauffe la dissolution saturée du sel à 40° au plus avec un excès d'oxyde de zinc pour saturer l'acide libre, on traite par le sulfate mercureux pour enlever l'excès d'oxyde de zinc dissous dans le sulfate et on fait ensuite cristalliser à 0° : on obtient des cristaux de sulfate de zinc pouvant alors être employés immédiatement.

Cet élément est très constant. Avec une surface d'électrode de zinc égale à 100 centimètres cubes et une résistance de 1 000 ohms, la chute de la force électromotrice de la pile en marche n'atteint pas $\frac{1}{1\,000}$; avec 100 ohms seulement, on aurait $\frac{1}{200}$. Pratiquement on pourra, avec une résistance de 1000 ohms, se contenter d'une surface de 30 centimètres carrés pour les électrodes, et se dispenser de l'emploi des accumulateurs. Mais alors on perd l'avantage théorique de la rigueur absolue de la méthode employée.

2° Une *boîte de résistance* qui comprend une résistances fixe d'environ 1 000 ohms et une série de résistance de 0 à 10 ohms permettant par leurs combinaisons de réaliser dans cet intervalle des résistances variant par dixièmes d'ohms. On peut, pour plus de simplicité, mais en perdant sur la précision, remplacer cette série de faibles résistances par un rhéostat unique de Pouillet d'une résistance totale de 10 ohms. Cet appareil est constitué par deux fils parallèles de un mètre de lon-

gueur et 3 millimèttres de diamètre faits avec un alliage de platine à 3 p. 100 de cuivre.

3° Un *galvanomètre* sensible donnant un déplacement appréciable pour 10 microvolts. Il est placé dans le circuit du couple. On peut prendre comme galvanomètre un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à faible résistance puisqu'il s'agit dans ce cas d'une méthode de réduction au zéro.

Pour faire une expérience on met par tâtonnement les deux extrémités du couple en communication avec deux points du circuit de la pile choisis de telle sorte que le couple ne soit traversé par aucun courant.

Dans ces conditions la force électromotrice du couple est égale et de signe contraire à la différence de force électromotrice entre les deux points du circuit, et celle-ci, en appelant

E la force électromotrice de la pile,

R la résistance totale du circuit,

r la résistance entre les deux points considérés,

a pour valeur

$$e = E \times \frac{r}{R}.$$

Méthode galvanométrique. — On peut ramener la mesure de force électromotrice à celle d'une intensité de courant; il suffit pour cela de mettre le couple en relation avec un circuit de résistance connue, et d'après la loi de Ohm, on aura

$$E = \frac{I}{R}.$$

Si l'on ne connaît pas la résistance R, mais que l'on sache seulement qu'elle est constante, on saura que la force électromotrice est proportionnelle à l'intensité, et cela suffira, à condition de faire la graduation du couple

avec la même résistance. Si cette résistance n'est qu'approximativement constante, la relation de proportionnalité ne sera qu'approximativement exacte.

Résistance des couples. — Les fils du couple font nécessairement partie du circuit dans lequel on mesure l'intensité du courant, et leur résistance varie par l'élévation de température. Il est important de se rendre tout d'abord compte de l'ordre de grandeur de cette variation inévitable de résistance.

M. Barus a fait un ensemble systématique d'expériences sur les alliages du platine avec 10 p. 100 d'un métal étranger.

La relation entre la résistance et la température étant de la forme

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

il a obtenu les résultats suivants :

	Pt pur	Au	Ag	Pd	Ir	Cu	Ni	Fe	Cr	Sn
Résistance spécifique en microhms (R). .	15,3	25,6	34,8	23,9	24,4	63,9	33,7	64,6	42	39
1 000 α. . .	2,2	1	0,7	1,2	1,2	0,2	0,9	0,4	0,5	0,7

D'autres essais ont donné les nombres ci-dessous :

	5 p. 100 Al	5 p. 100 Mn	10 p. 100 Mo	5 p. 100 Pb	2 p. 100 Sb	5 p. 100 Bi	2 p. 100 Zn	5 p. 100 Zn
R_0	22	50	17,6	7,7	29,5	16,6	47,8	25
1 000 α	1,5	0,4	1,9	1,8	1	2	0,3	1,1

Le coefficient α est pris entre 0° et 357° (température d'ébullition du mercure).

Les expériences de M. Le Chatelier, pour les couples qu'il emploie, l'ont conduit aux valeurs suivantes :

Pour le platine,

$$R = 11,2\ (1 + 0,002\ t) \text{ entre } 0^{\circ} \text{ et } 1\,000^{\circ},$$

Pour le platine rhodié (10 p. 100).

$$R = 27\ (1 + 0,0013\ t) \text{entre } 0 \text{ et } 1000^{\circ}.$$

MM. Holborn et Wien ont trouvé pour le platine pur :

$$R = 7,9\ (1 + 0,0031\ t) \text{ entre } 0^{\circ} \text{ et } 100^{\circ},$$
$$R = 7,9\ (1 + 0,0028\ t) \text{ entre } 0^{\circ} \text{ et } 1\,000^{\circ}.$$

Dans la généralité des cas, on emploie des couples de 1 mètre de longueur, dont les fils ont $0^{mm},5$ de diamètre ; leur résistance, qui est de 2 ohms à froid, devient double à 1 000°. Si l'on prend alors un galvanomètre d'une résistance de 200 ohms et que l'on néglige la variation de résistance du couple, l'erreur est égale à $\frac{1}{100}$. Le plus souvent cette erreur est encore moindre, sauf dans certains emplois industriels. Ainsi dans les expériences de laboratoire, la longueur chauffée dépasse rarement 10 centimètres, et alors l'erreur se réduit à $\frac{1}{1000}$.

Galvanomètres. — Les premières mesures, celles de Becquerel, de Pouillet, ont été faites avec des galvanomètres à aiguilles orientées par le magnétisme terrestre ; ces appareils, sensibles aux trépidations, sont très délicats comme réglage et les lectures sont très longues. L'emploi de ces instruments aurait empêché le procédé de devenir pratique. Ce n'est que grâce à l'emploi des galvanomètres à cadre mobile de MM. Deprez et d'Arsonval que le pyromètre électrique a pu devenir, comme il l'est aujourd'hui, un appareil d'usage courant.

Cet appareil (fig. 16) est composé d'un grand aimant en fer à cheval entre les branches duquel est suspendu un cadre mobile que traverse le courant. Ce cadre tend sous l'action du courant à se mettre dans un plan perpendiculaire à celui de l'aimant. Les fils métalliques, qui servent à la fois à suspendre le cadre et à amener le courant, éprouvent alors une torsion qui s'oppose au déplacement du cadre.

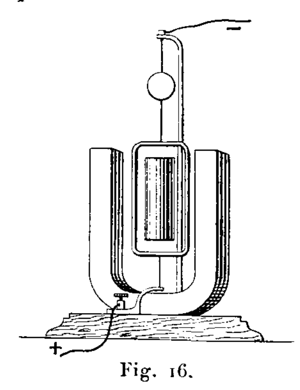


Fig. 16.

Celui-ci s'arrête dans une position d'équilibre qui dépend à la fois de l'intensité du courant et de la valeur du couple de torsion des fils. A ces deux forces s'ajoute en général une troisième force due à la pesanteur du cadre, qui amène des effets perturbateurs souvent très gênants. Il en sera parlé plus loin.

La mesure du déplacement angulaire du cadre se fait parfois au moyen d'une aiguille qui se déplace sur un cadran divisé, le plus souvent au moyen d'un miroir qui réfléchit sur une règle semi-transparente l'image d'un fil tendu devant une petite fenêtre convenablement éclairée.

Ces galvanomètres à cadre mobile ont longtemps passé aux yeux des physiciens comme impropres à toute mesure quantitative ; ils n'étaient employés que pour les méthodes de réduction au zéro et construits en conséquence. Pour les rendre propres à des mesures quantitatives d'intensité de courant il a fallu soigner une série de détails de construction, négligés auparavant. Voici les plus importantes d'entre elles.

1° Le *cadre mobile* doit présenter une résistance aussi

peu variable que possible avec la température ambiante pour éviter des corrections toujours très incertaines. Les cadres en fils de cuivre habituellement employés pour augmenter la sensibilité doivent être absolument rejetés, il faut exiger des cadres en fils de maillechort ou de métal semblable, à faible coefficient de température.

2° L'intervalle qui sépare les cadres, des branches de l'*aimant*, d'une part, du *noyau* central de fer doux de l'autre, doit être assez grand pour éviter certainement tout frottement accidentel qui s'opposerait au libre mouvement du cadre. Une largeur de 2 millimètres est convenable; il ne faut guère descendre en dessous. Les frottements à redouter ne résultent pas du contact direct du cadre avec l'aimant, ceux-là sont trop visibles pour passer inaperçus. Ce dont il faut se préoccuper, c'est du frottement des filaments de soie qui se dressent sur l'enveloppe isolante des fils métalliques, et de celui des poussières ferrugineuses qui viennent se coller sur l'aimant. C'est là, semble-t-il, la cause d'erreur la plus grave que l'on rencontre dans l'emploi du galvanomètre à cadre comme instrument de mesure. Rien n'avertit de ces légers frottements qui limitent le déplacement du cadre sans cependant lui enlever sa mobilité apparente.

3° Le fil de suspension doit être aussi solide que possible pour porter le cadre sans être exposé à des ruptures par les chocs; d'autre part, il doit être très fin pour n'avoir pas un couple de torsion trop élevé. Deux artifices différents permettent de concilier dans une certaine mesure ces deux conditions opposées : l'emploi du mode de suspension d'Ayrton et Parry qui consiste à remplacer le fil droit par une spirale faite avec un fil aplati, ou plus simplement l'emploi d'un fil droit aplati par un passage au laminoir.

Le premier procédé donne plus de garanties contre les chocs, il est, par contre, d'une réalisation plus difficile ; des précautions minutieuses doivent être prises pour empêcher tout frottement entre les spirales voisines. Le second procédé permet plus facilement d'avoir les grands déplacements angulaires qui sont indispensables quand on veut pouvoir faire la lecture sur un cadran.

La qualité la plus essentielle à demander aux fils est l'absence de torsion permanente pendant les opérations. Ces torsions amènent des déplacements du zéro qui peuvent fausser toutes les mesures si l'on n'en tient pas compte, qui les compliquent notablement si l'on est obligé d'en tenir compte. On obtient ce résultat en employant des fils aussi longs que possible, n'ayant pas moins de 100 millimètres, et en évitant de leur donner une torsion initiale, précaution dont on a le tort de ne pas se préoccuper habituellement. Quand on veut ramener le cadre au zéro de la graduation, on tourne souvent au hasard un quelconque des fils ; on peut arriver ainsi à donner à chacun des deux fils des torsions initiales de sens contraire souvent considérables. Si les deux fils ne sont pas symétriques, ce qui est le cas habituel, la déformation permanente résultant de cette torsion exagérée amènera un déplacement continu du zéro qui pourra se prolonger pendant des semaines et des mois, s'exagérant ou se ralentissant pendant les expériences suivant le sens du déplacement du cadre. Cette torsion est facile à éviter au moment de la construction, mais on ne peut vérifier ensuite son absence dans le cas de fils ronds ou de spirales qu'en démontant l'appareil. Au contraire, avec l'emploi des fils plats tendus, il est très facile à la simple vue de constater l'existence ou l'absence de torsion. C'est un motif de plus pour les employer.

Enfin il faut se servir de fils dont la limite élastique soit très élevée. Il faut pour cela que le métal ait été écroui, et, en outre, que le métal n'éprouve pas de recuit spontané à la température ordinaire. L'argent, généralement employé comme fil de suspension, ne vaut rien. Un métal comme le fer qui, même après recuit, possède une limite élastique élevée, serait parfait si ce n'était son altérabilité trop grande. On ne peut compter exclusivement sur l'écrouissage, parce que la soudure des fils indispensable pour assurer de bons contacts les recuit sur une certaine longueur. C'est le maillechort le métal le plus fréquemment employé dans les galvanomètres destinés aux mesures pyrométriques. L'alliage du platine à 10 p. 100 de nickel paraît préférable ; il garde après recuit une limite élastique notable et possède une ténacité bien plus élevée que celle du maillechort. Son inconvénient est seulement d'avoir un coefficient d'élasticité double, ce qui réduit à moitié les déviations pour une section donnée de fil.

4° L'*installation de l'appareil* pour les galvanomètres dans lesquels le cadre est porté par deux fils opposés *tendus* exige des précautions spéciales.

Il doit d'abord être placé à l'abri des vibrations du sol qui rendent toute lecture impossible ; il faut ensuite que sa position reste *rigoureusement* invariable. Si, en effet, les deux points extrêmes de suspension des fils ne sont pas exactement sur la même verticale et si le centre de gravité du cadre n'est pas exactement sur la ligne des points de suspension, deux conditions qui ne peuvent jamais être rigoureusement réalisées, l'appareil constitue un pendule bifilaire d'une sensibilité extraordinaire. Le plus léger déplacement suffit pour provoquer des déplacements angulaires considérables du cadre. Pour les éviter, l'appareil doit être porté

par un support métallique fixé à un mur en maçonnerie. Quand l'appareil est placé, comme on le fait souvent, sur une table en bois portée par un plancher ordinaire, il suffit, pour obtenir une déviation du cadre et par suite un déplacement du zéro, de marcher autour de la table, ce qui fait un peu fléchir le plancher, ou de provoquer un courant d'air qui, en changeant l'état hygrométrique des pieds de la table, la fait un peu incliner.

Les cadres librement suspendus par le haut sont à l'abri de ces inconvénients.

Différents types de galvanomètre. — Une série de galvanomètres ont spécialement été étudiés en vue des mesures pyrométriques ; nous allons rapidement les passer en revue.

On emploie souvent pour les recherches de laboratoire le modèle usuel des galvanomètres à cadre construits par M. Carpentier. Il faut s'assurer que ces instruments satisfont bien aux conditions indispensables qui viennent d'être rappelées, ce qui n'est pas toujours le cas quand ces instruments ont été construits en vue des expériences ordinaires de physique. Ces conditions sont :

Cadre en fil de maillechort d'une résistance de 200 ohms.

Espace libre suffisant entre le cadre et l'aimant.

Invariabilité du zéro, même après un déplacement angulaire notable du cadre.

Installation sur un support inébranlable.

Cet appareil de laboratoire, le seul qui existait au moment des premières recherches de M. H. Le Chatelier, n'était pas transportable et ne pouvait convenir pour les expériences dans les usines. Il a donc fallu étudier

un modèle spécial de galvanomètre facile à transporter et à installer. L'appareil (fig. 17) se compose de deux parties : le galvanomètre et l'échelle transparente avec sa lumière. Les deux parties sont symétriques et peuvent, pour le transport, se fixer dos à dos sur une même plan-

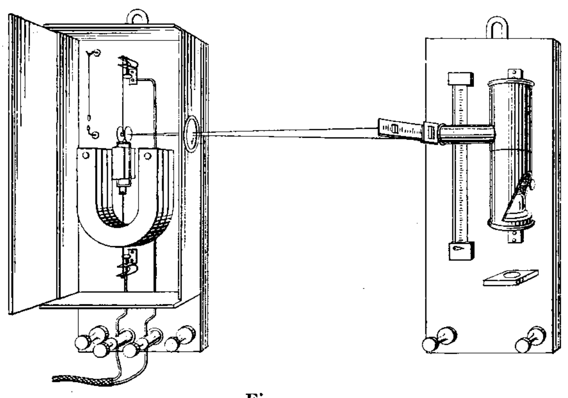


Fig. 17.

chette portée par une poignée. Pour les expériences, elles sont fixées sur un mur au moyen de deux clous plantés à une distance convenable. Les fils de suspension peuvent, en cas de rupture, être immédiatement remplacés. Ils portent, soudées à leurs deux extrémités, de petites sphères de nickel, que l'on n'a qu'à enfiler sur des fourchettes fixées les unes au cadre, les autres sur la monture de l'appareil. Le miroir est constitué par une lentille plan convexe, argentée sur la face plane, qui donne des images beaucoup plus nettes et plus brillantes que les petits miroirs ordinaires à faces parallèles.

Plus récemment, M. Carpentier a étudié dans le même but un galvanomètre où la lecture se fait au moyen d'un microscope. C'est un appareil très transportable et d'un emploi très commode. Il a seulement le défaut d'être sujet à un déplacement du zéro résultant du chauffage

dissymétrique du corps de la lunette par la petite lampe qui éclaire le réticule. Les fils tendus sont remplacés par de grosses spirales qui offrent une résistance absolue aux ruptures par choc pendant les transports.

L'emploi de cet appareil exige un dispositif qui permette de mettre au cours des expériences le galvanomètre en court circuit de façon à vérifier la position du zéro.

Dans les trois galvanomètres précédents la mesure du déplacement angulaire du cadre se fait par des procédés optiques ; dans les trois suivants la mesure se fait au moyen d'une aiguille se déplaçant sur un cadran.

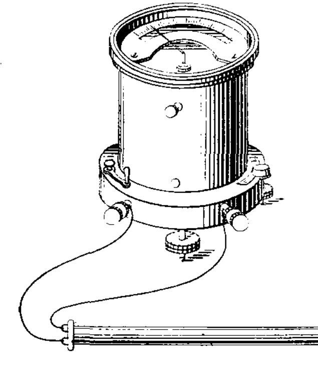


Fig. 18.

A la suite de l'étude faite par MM. Holborn et Wien au Physikalische Reichanstaltt de Berlin du pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier, la maison Kayser et Schmidt de Berlin étudia un galvanomètre (fig. 18) à aiguille qui fonctionne convenablement. Il a seulement le défaut d'être un peu fragile. Le fil de suspension du cadre ne semble pas avoir plus de 1/20e de millimètre de diamètre ; le montage de l'appareil est assez compliqué. On ne pourrait pas le réparer soi-même dans un laboratoire ou une usine.

La maison Siemens et Halske, qui a commencé depuis peu de temps la construction des galvanomètres Deprez d'Arsonval, a également étudié un modèle de galvanomètre à aiguille destiné aux mesures, de température (fig. 19).

Sa résistance est de 340 ohms ; le cadran présente 180 divisions correspondant chacune à 10 microvolts. Il y a en outre une seconde graduation qui donne directe-

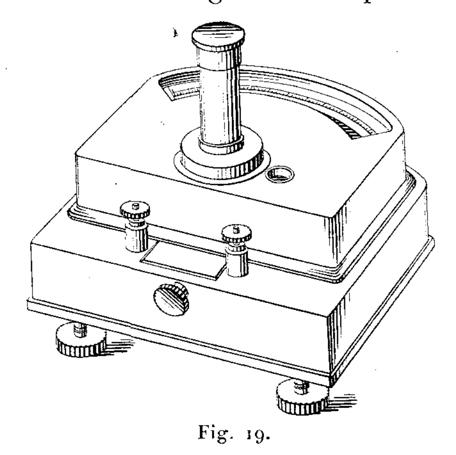


Fig. 19.

ment la température pour le couple vendu avec l'appa-

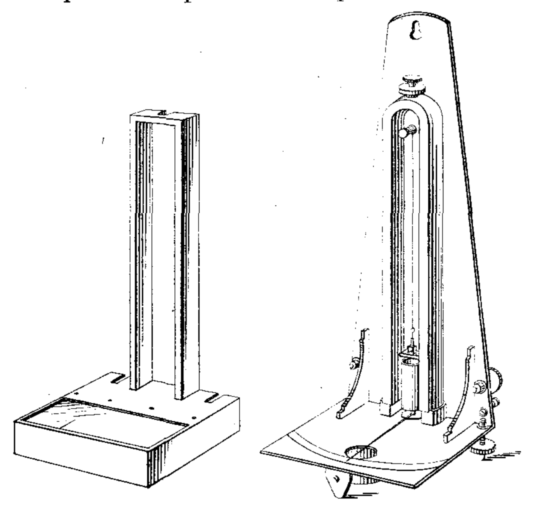


Fig. 20.

reil. Des commutateurs permettent de mettre successivement l'appareil en communication avec différents

couples thermo-électrique si l'on veut suivre parallèlement plusieurs observations.

M. Pellin, constructeur à Paris, a établi, d'après les indications de M. Le Chatelier, un galvanomètre (fig. 20) à aiguille d'une construction très rustique et qui peut être réparé sur place. Le fil de suspension très long est en platine à 10 p. 100 de nickel ; il a 1/10e de millimètre de diamètre et est aplati au laminoir. Le fil inférieur est constitué par une spirale du même fil de 1/20e de millimètre de diamètre qui est logé dans l'intérieur du noyau en fer doux, de façon à assurer l'uniformité de sa température. Lorsqu'en effet les spirales de suspension sont inégalement chauffées par le rayonnement du foyer ou par toute autre cause, il en résulte des déplacements considérables du zéro. Un niveau à bulle d'air permet de régler la verticalité de l'appareil, mais il est prudent en raison de la longueur du fil de suspension de s'assurer directement de l'absence de frottement du cadre. Pour cela on donne une légère secousse à l'appareil ; la pointe de l'aiguille doit prendre et conserver longtemps un léger mouvement d'oscillation dans le sens de sa longueur ; des oscillations transversales s'arrêtant rapidement indiquent un frottement du cadre. On peut évidemment employer un grand nombre d'autres modèles de galvanomètres qui existent dans le commerce, mais à condition de s'assurer au préalable qu'ils satisfont bien aux conditions nécessaires pour la bonne mesure des températures, ce qui est rarement le cas.

Disposition des fils du couple. — Le bon fonctionnement du couple exige quelques dispositions pratiques qui vont être passées en revue.

Jonction des fils. — Les contacts des différentes parties du circuit doivent être assurés d'une façon certaine,

le meilleur moyen est de les *souder* entre elles. Les vis de pression se desserrent souvent à la longue, ou les surfaces métalliques en contact s'oxydent. L'importance de cette précaution varie avec les conditions des expériences ; on pourra s'en dispenser pour des expériences qui ne dureront que quelques heures, parce qu'il y a bien peu de chance que les contacts se modifient pendant un temps si court ; la soudure est au contraire indispensable dans une installation d'usine qui aura à fonctionner pendant des mois sans être à nouveau vérifiée.

Mais dans tous les cas la soudure des deux fils du couple entre eux est absolument indispensable. Il est bien vrai que la force électromotrice est indépendante du mode de jonction. Les deux fils tortillés ensemble ou soudés donneront pour une même température la même force électromotrice. Mais sous l'action de la chaleur, les spires tordues ensemble se desserrent rapidement, et l'on arrive à avoir de mauvais contacts qui augmentent la résistance de tout le circuit. L'on ne s'aperçoit généralement de cet accident que lorsque la solution de continuité est presque complète, et l'on est exposé à faire au préalable toute une série de mesures fausses sans en être prévenu.

Le meilleur mode de soudure est la soudure autogène par fusion directe des fils du couple ; il faut, pour l'effectuer, avoir de l'oxygène. On commence par tortiller les deux fils sur 5 millimètres de longueur environ et on les installe à poste fixe au-dessus d'un chalumeau à gaz quelconque. On fait arriver l'oxygène par le tube central et le gaz par l'espace annulaire, l'oxygène est donné de suite en quantité normale, et le gaz en très faible quantité, puis on ouvre progressivement le robinet du gaz. On voit à un certain moment l'extrémité

des spires fondre en lançant des étincelles ; on arrête aussitôt le gaz. Si on attendait trop longtemps, la jonction fondrait complètement et les deux fils se sépareraient.

A défaut d'oxygène, on soude les fils avec le palladium qui peut être fondu au moyen d'un chalumeau à gaz alimenté à l'air, en prenant quelques précautions pour réduire l'action du rayonnement. On creuse dans un morceau de charbon de bois un trou dans lequel on place la jonction des deux fils tordus ensemble après l'avoir entourée d'un fil ou d'une petite lame de palladium et on dirige sur les fils le dard du chalumeau. La lampe d'émailleur qui se trouve dans tous les laboratoires convient très bien.

Dans les cas où le couple ne devrait servir qu'au-dessous de 1 000°, et seulement dans ce cas, on peut plus simplement encore faire la soudure à l'or ; la simple flamme d'un bec Bunsen suffit pour cette soudure.

Isolement et protection du couple. — Les deux fils doivent, sur toute leur longueur, être isolés l'un de l'autre. On se sert pour cela dans les laboratoires de tubes de verre ou de tuyaux de terre de pipe, et mieux encore d'un fil d'amiante enroulé autour des deux fils, en le croisant chaque fois entre les deux (fig. 24), de façon à faire une double boucle en forme de huit, chacun des fils passant dans une des boucles du huit. C'est de beaucoup le mode d'isolement le plus commode pour les laboratoires. Les deux fils avec leur enveloppe forment une petite tige ayant une certaine rigidité qui s'introduit assez facilement dans les appareils. On ne peut cependant dépasser ainsi les températures de 1 200 à 1 300° auxquelles l'amiante fond.

Pour les installations industrielles, il est préférable de se servir de petits cylindres en terre réfractaire de

100 millimètres de longueur, 10 millimètres de diamètre, percés parallèlement dans le sens de la longueur de deux trous de 1 millimètre à travers lequel on fait passer les fils. On met à la suite l'une de l'autre autant d'isolants semblables que cela est nécessaire. On les loge suivant les cas dans un tube en fer ou dans un tube en porcelaine. Le tube de porcelaine doit être employé dans les installations fixes où les températures peuvent dépasser 800°. On peut, comme le fait M. Parvillée dans ses fours à porcelaine (fig. 21), loger le tube de porcelaine dans la paroi du four de façon à ce que son extrémité fermée affleure sans la dépasser la paroi intérieure. On ménage dans la paroi autour de cette extrémité du tube un logement vide d'un décimètre de profondeur et autant de largeur. On facilite ainsi l'établissement de l'équilibre de température sans exposer le tube à de trop grandes chances de rupture par les chocs accidentels.

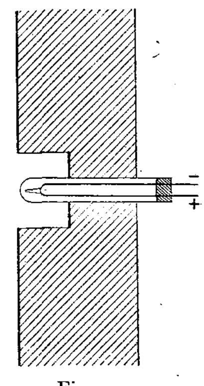
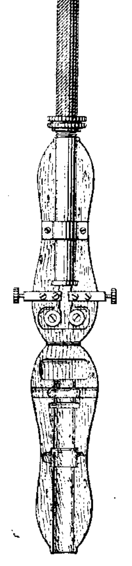


Fig. 21.

On emploie le tube de fer pour les températures ne dépassant pas 800°, dans les bains de plomb servant à la trempe de l'acier par exemple, et pour les couples mobiles qui ne sont exposées à la chaleur que pendant le temps nécessaire aux mesures. Dans ce cas on laisse la soudure dépasser les isolants et la canne en fer qui les contient d'au moins 5 centimètres. Les fils se mettent en équilibre de température au bout de cinq secondes au plus, et on peut avoir achevé la mesure avant que la canne


Fig. 22.

ne soit chauffée assez pour se brûler, même dans les fours à aciers dont la température dépasse 1 600°, et avant que les fils aient eu le temps de s'altérer, même dans les flammes très réductrices. L'autre extrémité de la canne en fer porte une poignée en bois (fig. 22) où se trouvent extérieurement les bornes de prise de courant, et intérieurement une longueur supplémentaire des fils du couple qui permet d'en faire sortir une nouvelle quantité en cas d'avarie. Le dessin ci-dessus donne les dispositions de cette poignée.

Dans tous les cas où le four dont on veut mesurer la température est en dépression, il faut prendre des précautions convenables pour empêcher toute rentrée permanente d'air froid par l'orifice nécessaire à l'introduction de la canne aussi bien avant la mesure que pendant. On s'exposerait sans cela à n'obtenir que des résultats inexacts.

Dans les cas d'expériences prolongées en atmosphère réductrice ou au contact de corps fondus capables d'altérer le platine comme les métaux par exemple, on doit protéger le couple en l'enfermant dans une enveloppe imperméable aux métaux fondus et aux vapeurs. Pour les installations fixes d'usine, on doit employer le tube de porcelaine, ou celui de fer, fermé bien entendu à l'extrémité où se trouve la soudure ; dans ce cas la dimension des tubes est sans importance. Pour les recherches de laboratoire, il est indispensable au contraire d'avoir autour des fils une enveloppe d'aussi petit diamètre que possible. S'il s'agit simplement de protéger le couple contre l'action des métaux non volatils, le plus simple est d'employer, comme le fait M. Roberts Austen, une pâte vendue en Angleterre sous le nom de Purimachos, qui sert à réparer les cazettes employées en céramique. Nous en avons fait

l'analyse qui nous a donné la composition suivante après dessiccation à 200°.

Alumine et fer	4
Soude	3,2
Eau	2,6
Silice (différence)	80,2

C'est du quartz très finement broyé additionné de 10 p. 100 d'argile et délayé avec une solution de silicate de soude. Pour l'employer, on délaye la matière de façon à en former une pâte épaisse et on y trempe le couple sur une certaine longueur, après avoir disposé les deux fils parallèlement et à une distance d'environ 1 millimètre.

On peut ensuite sécher et calciner très rapidement, sans crainte de faire sauter l'enduit, comme cela arriverait avec de l'argile seule; mais cette enveloppe n'est pas suffisamment imperméable pour protéger le couple contre les métaux très volatils, comme le zinc. Le mieux, dans ce cas, est d'employer de petits tubes de porcelaine de 5 millimètres de diamètre intérieur, 1 millimètre d'épaisseur de parois et 100 millimètres de longeur, droits ou courbés suivant l'usage auquel ils doivent servir.

Le couple isolé avec le fil d'amiante, comme il a été dit précédemment, est poussé progressivement jusqu'au fond du tube. Si l'on n'a pas sous la main des tubes semblables en porcelaine, et que l'on se propose de faire une fois par hasard une expérience à une température ne dépassant pas 1 000°, par exemple une graduation dans le zinc bouillant, on peut se contenter d'employer un tube de verre. Il fond et s'applique sur l'amiante qui en conserve une couche assez épaisse pour protéger le platine. Mais au refroidissement, le tube casse et il faut

à chaque opération recommencer un nouveau montage. Cela n'est donc pas pratique pour des expériences suivies.

Soudure froide. — En général, dans un élément thermo-électrique, on distingue la soudure chaude et la soudure froide. Cette dernière est supposée maintenue à température constante, et la soudure chaude à température variable. Pour réaliser rigoureusement ce dispositif, il faudrait donc trois fils, deux de platine et un d'alliage réunis par deux soudures. Cette disposition théorique est pratiquement sans intérêt et on se dispense toujours de la seconde soudure. Si, en effet, la température de tout le circuit en dehors de la soudure chaude est uniforme, la présence ou l'absence de la soudure froide ne change rien à la force électromotrice ; si cette température n'est pas uniforme, la seconde soudure ne sert pas davantage, car il y a dans le circuit une infinité d'autres soudures aussi importantes à considérer : les jonctions des fils de platine aux conducteurs en cuivre, celles de ces conducteurs au galvanomètre et des différentes parties du galvanomètre entre elles.

Il faut se contenter d'assurer aussi complètement que possible l'uniformité de température dans le circuit froid, et rigoureusement l'égalité de température entre les soudures correspondantes, particulièrement celles des deux fils de platine avec les conducteurs en cuivre. Ces incertitudes sur la température des soudures froides sont une cause importante d'erreur dans la mesure des températures par les couples thermo-électriques. Le jour où l'on voudrait arriver à des mesures précises à 1° près, par exemple, il faudrait réaliser des circuits complètement homogènes, y compris le galvanomètre, à la seule exception des deux jonctions des fils de pla-

tine avec les conducteurs ; celles-ci devraient être immergées dans un même bain à température constante. Il faudrait pour cela que les constructeurs de galvanomètres s'astreignent à employer un même maillechort pour toutes les parties de l'appareil, fils du cadre, fils de suspension, fils conducteurs et pièces du cadre. Cela est difficile à obtenir.

Graduation. — Il n'existe pas deux couples présentant exactement la même force électromotrice. Si l'on devait faire chaque fois une graduation avec le thermomètre à air, cette obligation rendrait illusoire les avantages de la méthode thermo-électrique. Pratiquement on se contente de faire cette graduation au moyen d'un certain nombre de points fixes de fusion et d'ébullition. Mais combien faut-il en prendre? Cela dépend de la nature de la fonction reliant la force électromotrice à la température.

Formule. — Avenarius et Tait ont montré que jusqu'à 300 la force électromotrice d'un grand nombre de couples était représentée d'une façon suffisamment exacte au moyen d'une formule parabolique à deux termes

$$e = a\,(t - t_0) + b\,(t^2 - t_0^2)$$

Les expériences de M. H. Le Chatelier sur le couple platine-palladium ont montré que la même formule s'applique encore pour ce couple jusqu'au point de fusion du palladium.

$$e = 4,3\,t + \frac{7,3}{1\,000}\,t^2$$

$t =$ 100	445	954	1 060	1 550
$e =$ 500	2 950	10 900	12 260	24 030

Mais cette loi est complètement en défaut pour les

couples formés par le platine pur avec un alliage de ce métal. Voici trois séries de déterminations faites sur différents couples :

Barus Pt — Pt 10 p. 100 Ir.		Le Chatelier Pt — Pt 10 p. 100 Rh.		Holborn et Wien Pt — Pt 10 p. 100 Rh.	
t	e	t	e	t	e
300	2 800	100	550	100	565
500	5 250	357	2 770	200	1 260
700	7 900	445	3 630	400	3 030
900	10 050	665	6 180	600	4 920
1 100	13 800	1 060	10 560	800	6 970
		1 550	16 100	1 000	9 080
		1 780	18 200	1 200	11 460
				1 400	13 860
				1 600	16 220

M. Silas Holmann a montré que les résultats de Holborn et Wien pouvaient être représentés par une formule logarithmique ne comportant que deux paramètres. Toutes les expériences peuvent être représentées par une formule semblable. Celles de M. H. Le Chatelier le sont par la formule :

$$\log e = 1,2196 \log t + 0,302$$

e est exprimé en microvolts.

Le tableau ci-après permettra de comparer les résultats observés à ceux qui ont été calculés au moyen de la formule précédente.

t (observé)	t (calculé)	e (en microvolts)	Log e	Log e — 0,3020	Log $t = \frac{\text{Log } e - 0{,}3020}{1{,}2196}$
100	102°,5	565	2,752	2,4500	2,010
Δ	(+ 2°,5)				
200	198°,2	1260	3,1004	2,7984	2,297
	(— 1°,8)				
400	405°	3030	3,4814	3,1794	2,608
	(+ 5°)				
600	602°	4920	3,6920	3,3900	2,780
	(+ 2°)				
800	800°	6970	3,8432	3,5412	2,903
	(0°)				
1000	996°	9080	3,9581	3,6561	2,998
	(— 4°)				
1200	1208°	11460	4,0591	2,7571	3,082
	(+ 8°)				
1400	1410°	13860	4,1418	3,8398	3,150
	(+ 10°)				
1600	1603°	16220	4,210	3,908	3,205
	(+ 3°)				

La même formule a été appliquée avec succès aux expériences de Barus sur les couples platine-platine iridié.

Points fixes. — Cette formule ne renferme que deux paramètres qui peuvent être déterminés au moyen de deux expériences. Il suffira donc de deux points fixes pour graduer un couple à condition cependant de les prendre assez écartés l'un de l'autre. Il sera bon de les choisir au voisinage de la région des températures dans lequel le couple doit plus particulièrement être employé. Si deux expériences suffisent en théorie, il sera prudent en pratique d'utiliser pour la graduation un plus grand nombre de points fixes de façon à avoir un contrôle de l'exactitude de ses opérations. Les points dont l'emploi est le plus recommandable en raison de la précision avec laquelle ils sont connus et de leur facilité d'emploi sont les suivants :

Ébullition de l'eau ;

Ébullition de la naphtaline, ou à défaut fusion de l'étain;

Ébullition du soufre, ou à défaut fusion du zinc;

Ébullition du zinc, ou à défaut fusion de l'or;

Fusion du platine.

Les points de fusion sont d'un emploi plus simple que les points d'ébullition aux températures élevées.

Ils sont d'un emploi un peu moins précis.

Pour les *points d'ébullition* de l'eau, de la naphtaline, du soufre, il est assez commode d'employer un dispositif indiqué par M. Barus (fig. 23). Un tube en verre mince, analogue aux tubes à essais, de 15 millimètres de diamètre intérieur, 300 millimètres de longueur, est un peu renflé par soufflage à 50 millimètres au-dessous de l'extrémité ouverte. Il est entouré par un manchon en plâtre de 150 millimètres de hauteur et 100 millimètres de diamètre qui a été coulé autour du tube de verre à l'intérieur d'un cylindre en toile métallique formant la surface extérieure. Le plâtre s'arrête à la naissance du renflement, et laisse dépasser en dessous le côté fermé du tube de 70 millimètres. Aussitôt que le plâtre a commencé à faire prise, on enlève le tube de verre en lui donnant un léger mouvement de rotation. On laisse sécher le cylindre et on y introduit à nouveau le tube. Cela permet quand le tube est cassé de l'enlever pour le remplacer, ce qui serait difficile s'il adhérait au plâtre.

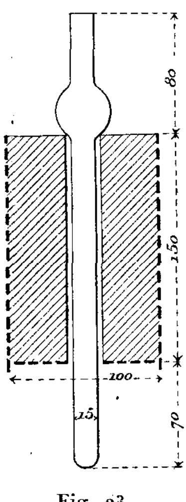
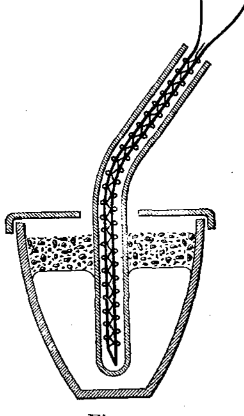


Fig. 23.

On chauffe la partie libre inférieure avec un bec Bunsen, doucement d'abord, puis sans aucune précaution spéciale, une fois l'ébullition établie. Le liquide en

repos doit occuper les 2/3 de la hauteur de l'extrémité libre du tube. On continue à chauffer jusqu'à ce que le liquide provenant de la condensation des vapeurs coule en abondance sur les parois du renflement supérieur du tube. On règle la flamme de façon à ce que la limite de condensation du liquide qui est très nette se tienne à mi-hauteur dans le renflement. On a alors une température parfaitement uniforme à l'intérieur du tube de verre sur toute la hauteur du cylindre en plâtre. On y plonge la soudure du couple et le cadre du galvanomètre arrive immédiatement se fixer à une position invariable.


Fig. 24.

Pour le point d'ébullition du zinc, M. Barus a fait construire des petits creusets en porcelaine très ingénieusement disposés, mais aussi très compliqués, partant fragiles et coûteux. On peut plus simplement se contenter d'un creuset en porcelaine de 70 millimètres de profondeur (fig. 24), rempli de zinc fondu sur 50 millimètres de hauteur, et par-dessus 20 millimètres de poussier de charbon. Un couvercle percé d'un trou central laisse passer un petit tube en porcelaine renfermant le couple. On chauffe jusqu'au moment où l'on voit une petite flamme blanche de zinc sortie du creuset. Il est indispensable que les passages pour la sortie de la vapeur de zinc soient assez larges. Ils tendent, en effet, à se boucher par un dépôt d'oxyde de zinc qui soude en même temps le couvercle au creuset, et celui-ci fait explosion quand il n'y a plus d'issue pour les vapeurs de zinc.

On peut employer très avantageusement, pour ce

chauffage et plus encore pour le chauffage de petits creusets à température très élevée, un modèle de fours de fabrication anglaise (fig. 25), qui a l'avantage de résister presque indéfiniment à l'action de la chaleur et d'être d'une réparation très facile. Le principe de construction de ces fours est de les composer de deux couches concentriques. L'enveloppe extérieure, en terre

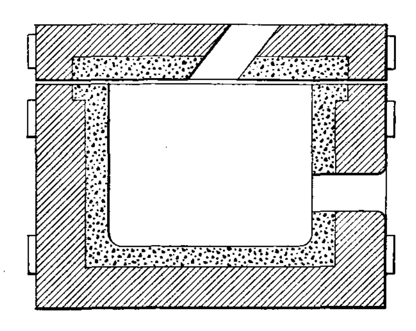


Fig. 25.

réfractaire, et cerclée en fer, donne la solidité au four; elle ne reçoit qu'indirectement l'action de la chaleur et n'est pas exposée à se fendre par retrait sous l'action des températures trop élevées. L'enveloppe intérieure, qui seule reçoit l'action du feu, est composée de sable quartzeux *grossier*, grains de 1 millimètre, agglomérés par une petite quantité d'un fondant. Sous l'action d'une température élevée, le quartz n'éprouve pas de retrait comme l'argile; il gonfle au contraire en passant à l'état de silice amorphe avec un changement de densité de 2,6 à 2,2. Mais cette transformation ne se fait qu'avec une lenteur extrême, sans quoi elle ferait éclater le four. Si par hasard cette enveloppe intérieure venait à tomber, on la remplace facilement en plaçant dans le four une fiole en verre de diamètre approprié, entouré d'une feuille de papier huilé, et en tassant

autour du gros sable quartzeux faiblement humecté avec une solution sirupeuse de silicate alcalin. On chauffe ce four par une ouverture latérale avec un chalumeau de Flechter qui a l'avantage d'être très robuste ou avec un chalumeau à gaz quelconque.

Pour l'emploi des *points de fusion*, il y a plusieurs cas à distinguer. Si l'on peut employer une grande quantité de métal comme avec le zinc, le plomb, l'étain, le plus simple est de les fondre dans un creuset, d'y plonger le couple convenablement protégé et de laisser refroidir. On observe sans aucune difficulté la température stationnaire de solidification.

Si l'on ne peut employer qu'une petite quantité de métal comme c'est le cas de l'or, ou si l'on n'a pas d'installation pour chauffer des creusets, il est possible d'observer les points de fusion de la façon suivante : on enroule autour de la soudure, de façon à la couvrir complètement, un fil fin de métal choisi, il suffit avec un peu d'habitude de un centigramme de métal, et on place le couple dans une enceinte à température stationnaire très légèrement supérieure à celle de fusion, ou à température croissant très régulièrement. On suit les indications du galvanomètre qui, au moment de la fusion, présente un léger arrêt suivi d'un départ brusque. Mais cette perturbation est d'autant plus faible que la masse de métal est plus petite, et il faut une certaine habitude de ce genre d'expérience pour saisir avec certitude le petit arrêt. Il est indispensable bien entendu que le chauffage lui-même soit absolument régulier. Il est impossible d'obtenir ce résultat avec une flamme libre qui est toujours flottante. Pour avoir une température stationnaire on prendra au laboratoire un tube ou un moufle dans un fourneau depuis longtemps allumé, à l'usine une cheminée ou un carneau de sortie de fumée. Dans ces

enceintes la température varie d'un point à un autre et on peut, après quelques tâtonnements, trouver la température convenable. Pour opérer à température croissante, ce qui est le plus commode dans les laboratoires, on place la soudure convenablement préparée dans un petit creuset rempli d'une matière pulvérulente, non fusible et peu conductrice, ou bien on entoure simplement la

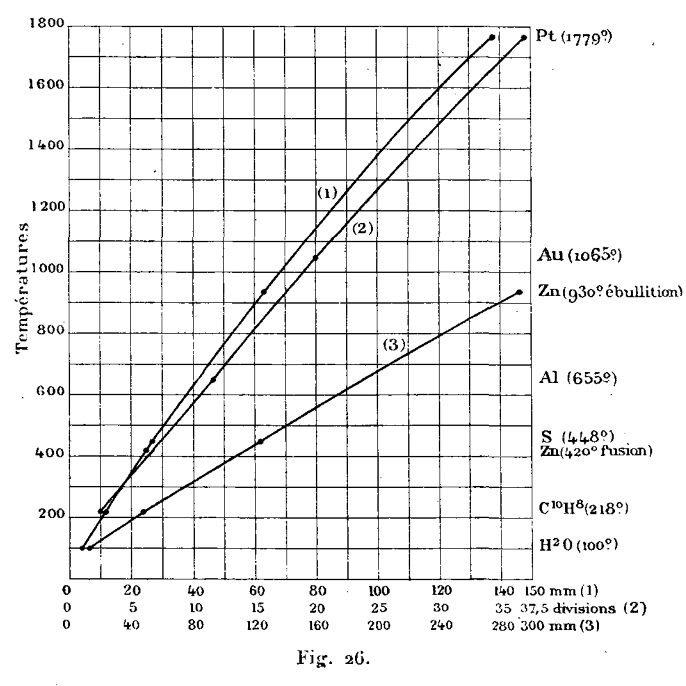


Fig. 26.

soudure d'une boulette de plâtre, d'argile, de Purimachos. On a soin de commencer par dessécher et déshydrater lentement cette boulette. Pour l'empêcher d'éclater, on la place alors dans une flamme assez chaude pour amener la fusion du métal; cette flamme doit être bien fixe.

Pour la fusion du platine on doit procéder d'une façon différente. On utilise la fusion des fils du couple, dans l'opération même qui sert à faire la soudure. Il faut

être deux opérateurs, l'un qui suit le galvanomètre, l'autre qui observe la fusion du platine. Il est nécessaire d'employer une flamme assez grande pour que la température soit régulière sur une certaine hauteur. On place la jonction des deux fils tordus à 50 millimètres au moins au-dessus du chalumeau, on donne un fort débit d'oxygène et on ouvre peu à peu le robinet du gaz jusqu'à fusion.

Le même procédé peut être employé pour la fusion de l'or, avec un chalumeau à air, à condition que la flamme de celui-ci soit maintenue bien constante, ce qui n'est pas possible avec les souffleries au pied. Ce procédé est cependant moins précis que ceux qui ont été précédemment indiqués.

Nous donnerons ici les courbes (fig. 26) de graduation de différents couples, reliés à des galvanomètres différents ou, dans le cas de la méthode par opposition, à un rhéostat de Pouillet. Dans ce dernier cas le zéro de la graduation ne correspond pas à une force électromotrice nulle, et par suite à une température égale à la température ambiante en raison de la résistance supplémentaire d'un fil conducteur qui venait s'ajouter à celle du rhéostat.

Points fixes.		Galvanomètre à miroir.	Galvanom. à aiguille.	Méthode d'opposition.
Ebullition de l'eau. . .	100°	4,5 divis.		
Ebullition de la naphtaline.	218	12	2,5 divis.	13 mm.
Fusion de zinc	420	26		
Ebullition du soufre. .	445	28		123
Fusion de l'aluminium.	655		12	
Ebullition du zinc . . .	930	64		294
Fusion de l'or.	1 065		20	
Fusion du platine . . .	1 780	137,5	37	

Résultats d'expériences. — La mesure des tempéra-

tures par les couples thermo-électriques a permis de préciser un grand nombre de températures élevées sur lesquelles on n'avait que des idées nulles ou inexactes. Les mesures ont été particulièrement nombreuses dans les recherches scientifiques et industrielles relatives au fer. C'est avec le couple thermo-électrique que M. Osmond et ses continuateurs, MM. Roberts Austen, Arnold, Howe, Charpy ont fait toutes leurs études sur les transformations moléculaires des fers et aciers. Les conditions de fabrication et de traitement de ces métaux ont été précisées par l'introduction courante dans les usines de ce procédé de mesure des températures élevées. Nous donnerons à titre d'exemples une série de déterminations faites par M. H. Le Chatelier dans un certain nombre d'appareils industriels.

Acier. — Four Siemens-Martin.

Gaz à la sortie du gazogène.	720°
Gaz à l'entrée du récupérateur	400
Gaz à la sortie du récupérateur.	1 200
Air à la sortie du récupérateur	1 000
Intérieur du four pendant l'affinage	1 550
Fumée au pied de la cheminée.	300

Verre. — Four à bassin pour bouteilles.
Four à pots pour vitres.

Four	1 400°
Verre en affinage.	1 310
Recuit des bouteilles.	585
Etendage du verre à vitre.	600

Gaz d'éclairage. — Four à gazogène.

Haut du four	1 190°
Bas du four.	1 060
Cornue en fin de distillation	975
Fumées au bas du récupérateur.	680

Porcelaine. — Fours.

Porcelaine dure	1 400°
Porcelaine de Chine	1 275

Conditions d'emploi. — Les couples thermo-électriques en raison de leur facilité d'emploi et de la précision de leurs indications sont préférables à tous les autres procédés pyrométriques pour les recherches courantes scientifiques ou industrielles, et en fait ils sont à peu près seuls employés aujourd'hui à cet usage. Leur emploi cependant n'est pas à recommander pour les recherches de haute précision ; la préférence devra, comme nous l'avons déjà dit, être donnée au pyromètre à résistance électrique dès qu'on aura le moyen de le graduer avec précision jusqu'aux températures élevées. Dans un ordre d'idées tout différent on sera encore amené à laisser de côté les couples thermo-électriques quand on ne disposera pas d'un personnel assez expérimenté pour faire la petite installation électrique nécessaire, ou quand on reculera devant la dépense d'acquisition d'un galvanomètre.

CHAPITRE VII

PYROMÈTRE A RADIATIONS CALORIFIQUES

Principe. — La quantité de chaleur que reçoit un corps par rayonnement d'un autre corps dépend de certaines conditions relatives à chacun des deux corps, qui sont :

1° Leur température ;

2° Leur surface ;

3° Leur distance ;

4° Leur pouvoir émissif et absorbant.

Pour utiliser la radiation calorifique à l'évaluation des températures, on mesure un changement calorifique produit sur le corps instrument par le corps étudié ; ce changement calorifique est, soit une élévation de température, soit un phénomène résultant, tel qu'une variation de résistance électrique, une force thermo-électrique, etc.

La quantité de chaleur rayonnée est proportionnelle à la surface rayonnante ; elle varie en raison inverse du carré de la distance l.

$$q = k \frac{S}{l^2} = k' \frac{d^2}{l} = k''E. \frac{d^2}{l^2}$$

d étant le diamètre de la surface rayonnante S,
E son pouvoir émissif.

Or, $\frac{d}{l}$ est le diamètre apparent de l'objet ; la quantité

de chaleur rayonnée dépend donc de l'angle du cône sous lequel l'objet est vu.

Le pouvoir émissif E est très variable d'un corps à l'autre, et pour un même corps, variable avec la température. Il serait nécessaire de le déterminer, mais cela est difficile, souvent impossible, surtout aux températures élevées.

Le coefficient k'' est une fonction de la température seule, qui exprime la loi de variation de la radiation avec la température. Cette loi doit être déterminée au préalable. C'est de sa connaissance plus ou moins exacte que dépend toute la précision des résultats. L'exactitude des mesures expérimentales n'a pratiquement, dans l'état actuel, qu'une influence secondaire.

Voyons maintenant quels sont les dispositifs expérimentaux qui ont été employés pour mesurer l'intensité des radiations calorifiques ; ces mesures n'ont eu pour but jusqu'ici que la détermination de la température du soleil, mais elles pourraient servir à d'autres usages.

Expériences de Pouillet. — Antérieurement à Pouillet, *Gasparin* avait déjà fait quelques essais ; son appareil se composait d'une sphère creuse de laiton montée sur un pied et noircie ; un thermomètre servait à mesurer l'élévation de température de l'eau contenue dans la sphère. L'avantage de ce dispositif était que l'appareil était toujours orienté convenablement vers le soleil.

Le *pyrhéliomètre* de Pouillet est constitué par un calorimètre qui mesure directement la chaleur reçue par rayonnement (fig. 27).

Une boîte d'argent très mince est portée par un tube creux, fendu suivant une génératrice pour laisser voir le thermomètre.

La boîte a 100 millimètres de diamètre sur 15 mil-

limètres de hauteur ; elle contient 100 centimètres cubes d'eau. A la partie inférieure du tube se trouve un disque métallique de même diamètre que la boîte, et destiné à orienter l'appareil vers le soleil : il suffit, en effet, que les ombres de la boîte et du disque coïncident exactement pour que le système soit convenablement orienté. Un bouton permet de faire tourner l'appareil sur lui-même pour agiter l'eau. Enfin, un support donne la possibilité de placer le système dans une orientation quelconque.

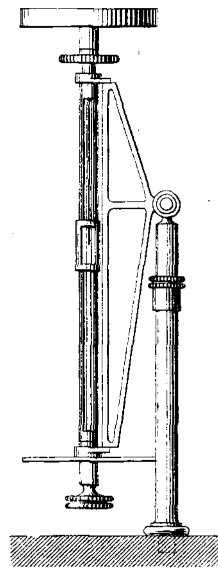


Fig. 27.

Pour faire une détermination, on installe l'appareil et on le préserve de l'action du soleil à l'aide d'un écran ; on note la marche du thermomètre pendant cinq minutes ; on enlève l'écran et on observe les indications du thermomètre pendant cinq minutes ; on remet l'écran, et on fait une nouvelle lecture du thermomètre pendant cinq minutes.

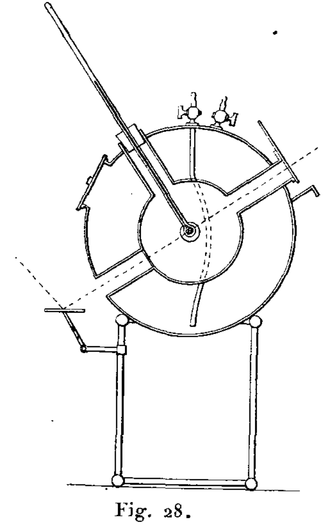


Fig. 28.

La première et la troisième lecture servent à faire les corrections dues au milieu ambiant. Pouillet a observé ainsi une élévation de 1° en cinq minutes.

Dans la détermination de la température du soleil, il fallait tenir compte, bien

entendu, de la chaleur absorbée par l'atmosphère (elle est environ 20 p. 100 de la radiation totale du soleil). Pouillet a trouvé ainsi 1300° pour température du soleil.

Expériences de M. Violle. — M. Violle emploie un *actinomètre* dont le principe est tout différent de celui des appareils précédents; on observe l'équilibre stationnaire d'un thermomètre soumis simultanément au rayonnement d'une enceinte à température fixe, et à celui du corps chaud considéré (fig. 28).

L'appareil est constitué par deux enveloppes sphériques, concentriques, en laiton, dans lesquelles on peut établir une circulation d'eau à température constante, ou même substituer la glace à l'eau. L'enveloppe intérieure, de 150 millimètres de diamètre, est noircie intérieurement. Le thermomètre T a un réservoir de forme sphérique dont le diamètre varie de 5 à 15 millimètres; la surface du réservoir est également noircie. La tige est divisée en 1/5 de degré.

Le tube d'admission porte un diaphragme D percé de trous de différents diamètres; sur le prolongement de ce tube, se trouve une ouverture fermée par une glace dépolie et légèrement noircie g, qui permet de constater que les rayons solaires tombent bien exactement sur la boule du thermomètre.

L'établissement de l'équilibre de température demande quinze minutes, et les écarts de température observés varient de 15 à 20°.

M. Violle a ainsi trouvé, pour la température du soleil, des nombres variant de 1 500° et 2 500°.

Pouillet et M. Violle ont employé la loi du rayonnement de Dulong et Petit :

$$q = a^t$$

que leurs auteurs avaient établi par des expériences poussées jusqu'à 300°.

La constante *a* peut être déterminée pour chaque appareil par une expérience unique faite à une température connue. Cette loi, comme nous l'indiquerons plus loin, n'est pas exacte de sorte que, suivant la température employée pour déterminer la constante, on trouve à celle-ci une valeur différente, et par suite aussi des valeurs différentes aux températures calculées en partant de cette loi. C'est là la raison des écarts entre les trois nombres 1 300, 1 500 et 2 500 de Pouillet et Violle. Ils correspondent à des déterminations de la constante obtenues au moyen d'expériences préliminaires faites aux températures de 100°, 300° et 1 500°.

Le père Secchi en employant la formule de Newton,

$$q = a\ (t_1 - t_0)$$

beaucoup plus inexacte encore, a trouvé pour la température du soleil plusieurs millions de degrés.

Expérience de Rosetti. — Un savant italien, *Rosetti*, a compris le premier l'importance capitale du choix de la loi admise pour le rayonnement ; il a montré qu'une graduation faite avec une expérience à 300° donne pour la température d'un corps chauffé dans la flamme oxhydrique :

46 000 si l'on emploie la loi de Newton.
1 100 — — Dulong et Petit.

Or la température dans la flamme oxhydrique est voisine de 2 000°.

Ce physicien a employé une pile thermo-électrique dont la sensibilité peut être changée sans toucher à

l'élément; dans l'appareil de M. Violle, il faut, au contraire, changer le thermomètre, ce qui rend les expériences difficilement comparables.

La pile (fig. 29) est constituée par 25 lames de bismuth et d'antimoine ; ces lames sont très minces, puisque l'ensemble de l'appareil n'a que 5 millimètres de

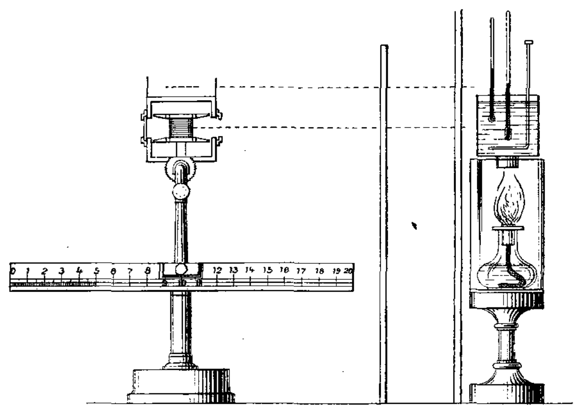


Fig. 29.

côté. Le tout est contenu dans un petit tube de métal (fig. 19).

Pour faire une expérience, on dispose d'abord devant la pile un écran rempli d'eau, que l'on enlève au moment où l'on veut faire une mesure.

Une première graduation faite avec un cube de Leslie en fer rempli de mercure que l'on a chauffé de 0° à 300° a donné ; les résultats suivants :

Excès de la température du cube sur la température ambiante.	Division du galvanomètre.
32°,8	10
112°,8	55
192°,8	141,9
272°,8	283,5

La loi de Newton et celle de Dulong et Petit ne don-

nant aucune concordance entre les nombres trouvés et les nombres calculés, Rosetti a proposé la formule :

$$Q = a\,T^2\,(T - \theta) - b\,(T - \theta),$$

T température absolue du corps rayonnant; θ température ambiante absolue. Cette formule à deux paramètres permet nécessairement de suivre le phénomène de plus près qu'une formule à un seul paramètre.

$T - \theta$	DÉVIATIONS observées.	DÉVIATIONS CALCULÉES	
		Loi de Dulong.	Loi de Rosetti.
50	A = 17,2	A + 2,12	A — 0,23
100	46,4	+ 0,95	»
150	90,1	— 2,12	A + 0,70
200	151,7	+ 4,82	+ 0,99
250	234,7	+ 2,83	— 0,12

Rosetti a montré ensuite que la formule qu'il a proposée ne conduisait pas à des résultats absurdes pour les températures plus élevées. Une masse de cuivre fut chauffée au rouge dans une flamme, et on estima sa température par la méthode calorimétrique (procédé assez incertain parce qu'on ne connaît pas la loi de variation de la chaleur spécifique du cuivre). Les deux méthodes donnèrent, l'une 735° et l'autre 760°. Cet écart de 25° est inférieur aux incertitudes expérimentales.

Des disques de métal noircis et placés dans le haut de la flamme d'un bec Bunsen ont donné, d'après la formule, des températures voisines de 1 000° ; de l'oxychlorure de magnésium dans le chalumeau oxhydrique a donné 2 300°. Tous ces nombres sont vraisemblables.

Rosetti en employant cette formule a trouvé 10 000° pour la température du soleil, ce nombre résultant d'une extrapolation depuis 300°.

Expériences de Wilson et Gray. — Ces savants ont mesuré l'intensité de la radiation au moyen d'une soudure thermo-électrique, procédé dont l'idée première est due à MM. Deprez et d'Arsonval. Un cadre mobile formé de deux métaux différents (argent et palladium) est suspendu par un fil de cocon de soie entre les branches d'un aimant. On fait tomber la radiation solaire sur une des soudures, tandis qu'on dirige sur l'autre soudure une source de chaleur qui équilibre exactement

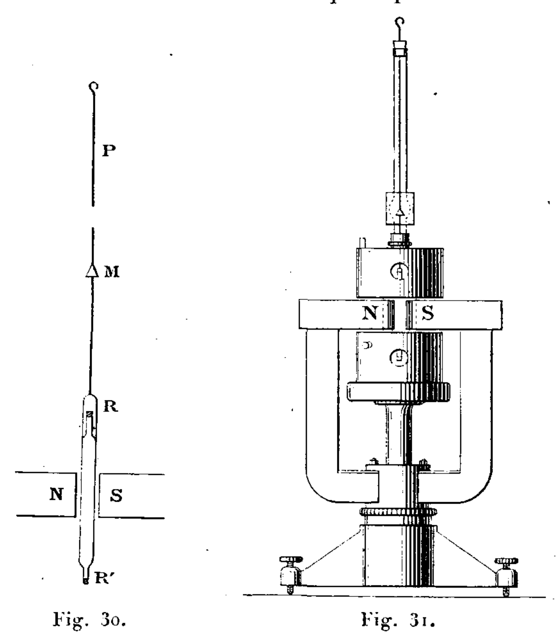


Fig. 30. Fig. 31.

la première. Comme la température de cette source auxiliaire est nécessairement moindre, il faut que l'angle apparent sous lequel elle est vue par le galvanomètre soit plus grand.

MM. Wilson et Gray ont employé un dispositif similaire au radiomicromètre de M. du Boys. Le fil de suspension est en quartz ; les métaux employés sont le

bismuth et l'antimoine : la force électromotrice ainsi produite est vingt fois plus grande que celle obtenue avec le couple argent-palladium. Les lames métalliques R et R′ (fig. 30) sont très minces ($0^{mm},1$), ce qui rend la construction de l'appareil assez délicate. Pour protéger le cadre mobile contre les courants d'air on l'entoure d'une enveloppe métallique (fig. 31) ; un tube ouvert laisse pénétrer la radiation ; des diaphragmes placés à l'intérieur de ce tube s'opposent à toute agitation de l'air.

Au lieu de mesurer comme on aurait pu le faire l'angle de déplacement de l'équipage mobile, les auteurs ont préféré employer une méthode de réduction au zéro en utilisant une autre radiation, celle du *meldomètre* de M. Joly appareil qui sert également à la graduation du radiomicromètre. Le meldomètre est constitué par une lame de platine chauffée par un courant électrique ; les dimensions sont les suivantes : 102 millimètres de longueur, 12 millimètres de largeur et $0^{mm},01$ d'épaisseur. Cette lame est disposée au milieu d'une enceinte entourée d'eau. Fixée à une extrémité, elle est tendue à l'autre par un ressort et porte de ce côté un levier sur lequel est fixé un miroir, dispositif destiné à amplifier les variations de longueur de la lame résultant de son échauffement par le passage d'un courant plus ou moins intense.

On détermine la relation entre les changements de longueur et la température au moyen de la fusion de très petits fragments (1/10 de milligramme) de corps dont on connaît le point de fusion : MM. Wilson et Gray ont employé les suivants, qui, pour l'or et le palladium, sont certainement trop faibles.

Chlorure d'argent	452°
Or	1045
Palladium	1500

Ils ont, avec cet appareil, vérifié jusqu'à la fusion du platine, la loi du rayonnement donnée par Stefan

$$Q = a\,(T^4 - T_0^4).$$

Pour les expériences de graduation, on éloigne le meldomètre de façon à rendre son action sur le radiomicromètre toujours la même, et on admet que l'intensité varie en raison inverse du carré de la distance. Il est de plus nécessaire de connaître le pouvoir émissif du platine ; Wilson et Gray ont pris comme point de départ des résultats fournis par des expériences antérieures :

t	Pouvoir émissif.
300°	$\frac{1}{5{,}4}$
600°	$\frac{1}{4{,}2}$
800°	$\frac{1}{3{,}9}$

et, par extrapolation ils ont trouvé 1/2,9 à la température de 1 250°, température qui équilibrait la radiation du soleil, avec l'angle apparent assez grand, sous lequel l'appareil voyait le meldomètre.

En admettant alors avec Rosetti et Young une absorption zénithale de 30 p. 100, la température du soleil, supposé un corps noir, a été trouvée égale à 6 200° environ.

Ce nombre doit être un peu trop faible, en raison de l'erreur commise sur les points de fusion employés pour la graduation.

Expériences de Langley. — Langley a proposé, sous le nom de bolomètre, un appareil radiométrique qu'il n'a jamais employé à la mesure des températures, mais

qui pourrait l'être comme les précédents et qui a sur eux l'avantage d'être bien plus sensible encore.

Il consiste en un pont de Wheatstone constitué avec des fils plats extrêmement minces ($0^{mm},01$) et très courts (quelques millimètres au plus). On mesure les variations de résistance de l'un des fils du pont soumis à la radiation. Le courant qui traverse le système est capable d'élever déjà la température des fils de 3° à 4° ; le supplément de chaleur fourni à l'un des fils produit une déviation du galvanomètre.

Le système est fixé au fond d'un tube qui peut être orienté comme une lunette vers le corps dont on veut mesurer le rayonnement; des diaphragmes fixés de place en place arrêtent les courants d'air intérieurs. On peut aussi, à l'aide d'une lentille, concentrer la radiation sur le fil et amplifier ainsi beaucoup l'effet produit quand l'angle apparent de l'objet est petit.

Le bolomètre de Langley n'a guère servi jusqu'ici qu'à étudier la répartition de l'énergie radiante dans le spectre solaire, et surtout dans l'infra-rouge.

Conditions d'emploi. — On s'est étendu assez longuement sur les pyromètres par radiation qui n'ont pourtant servi jusqu'ici qu'à un usage bien spécial, l'estimation de la température du soleil, parce qu'il est possible qu'un jour ou l'autre leur usage pénètre dans les usines où ils pourraient rendre de réels services. Dans un certain nombre d'appareils industriels, les températures sont tellement élevées, qu'aucun corps, même le platine, ne peut résister longtemps à leur action. Le jour où l'on voudra avoir des appareils à indications continues et, en même temps, tout à fait inaltérables, il faudra s'adresser aux pyromètres à radiation.

Un tube en terre réfractaire traversant la paroi du

four, pénétrant au milieu de celui-ci sur une longueur de $0^m,50$ à 1 mètre, bouché vers l'intérieur et ouvert vers l'extérieur, donnerait une surface rayonnante à la température du four qui pourrait être examinée au moyen d'une lentille projetant sur l'appareil de mesure l'image du fond fermé de ce tube.

CHAPITRE VIII

PYROMÈTRE A RADIATION LUMINEUSE

Principe. — Au lieu d'utiliser la totalité de l'énergie rayonnée comme dans les méthodes décrites au chapitre précédent, on emploie seulement les radiations visibles. Cette utilisation peut se faire de bien des façons différentes, qui donnent des méthodes inégalement précises et d'un emploi inégalement facile.

Avant d'aborder leur étude, il est utile de rappeler quelques propriétés des radiations.

Lois de Kirchoff. — Un corps incandescent émet des radiations de longueurs d'onde différentes. Pour une longueur d'onde donnée et une température donnée, l'intensité de cette radiation émise n'est pas la même pour les différents corps : on dit qu'ils ont, pour cette radiation, un *pouvoir émissif* différent. De même, un corps, qui reçoit des radiations d'une longueur d'onde donnée, en absorbe une partie et en renvoie une autre partie par diffusion ou réflexion ; une certaine quantité pourra même traverser le corps. Le pouvoir *diffusif*, ou *réfléchissant*, ou *transmettant*, à une température donnée, pour une longueur d'onde donnée, varie d'un corps à l'autre. *Le pouvoir émissif et le pouvoir diffusif* (dans le cas de corps opaque et non réfléchissant) *varient toujours en sens inverse en restant complémentaires l'un de l'autre.*

Les corps à grand pouvoir émissif, comme le noir de fumée, ont un faible pouvoir diffusif; les corps à faible pouvoir émissif, comme l'argent poli, la magnésie, ont un très grand pouvoir diffusif ou réfléchissant.

Si l'on prend comme mesure du pouvoir émissif le rapport de l'intensité de la radiation du corps considéré à celle du noir de fumée à la même température, et comme mesure du pouvoir diffusif le rapport de l'intensité de la radiation diffusée à la radiation incidente, la somme de ces deux grandeurs est égale à l'unité.

Kirchoff a démontré que dans une enceinte à température uniforme, percée d'une petite ouverture pour regarder à l'intérieur, l'intensité de chaque radiation ne dépend que de la température et est indépendante de la nature du corps. Les corps à grand pouvoir émissif, comme le noir de fumée, ont une intensité de radiation se rapprochant de celle d'une semblable enceinte sans jamais lui être supérieure.

Pour abréger, nous appellerons corps absorbant noir ou simplement *corps noir* un corps qui aurait le même pouvoir émissif que l'enceinte précitée, et dont le pouvoir émissif sera pris comme unité.

Le pouvoir émissif d'un corps varie d'une radiation à une autre, et par suite aussi son pouvoir diffusif ou transmettant, puisque ces deux pouvoirs sont complémentaires l'un de l'autre. Il en résulte que les proportions relatives des radiations visibles, reçues ou renvoyées par un corps, ne sont pas les mêmes; par suite, les corps différents, à une même température, nous paraîtront diversement colorés.

A une même température, la couleur propre d'un corps et sa couleur apparente, quand il est éclairé avec la lumière blanche, sont complémentaires l'une de l'autre. Les corps jaunes, comme l'oxyde de zinc à

chaud, émettent une lumière bleu verdâtre. Aux températures usuelles plus petites que 2 000°, les radiations rouges prédominent beaucoup et noient les inégalités des radiations des autres longueurs d'onde. Pour rendre facilement visibles les colorations des corps rayonnants, il faut les comparer à celles d'un corps noir dans les mêmes conditions de température. Un trou percé dans le corps, ou une fissure traversant la surface, donnent un très bon terme de comparaison pour juger de cette coloration.

L'intensité des radiations émises par un corps noir croît toujours avec la température, et d'autant plus rapidement que la région du spectre se rapproche du bleu; mais d'autre part, les radiations du côté du rouge commencent les premières à avoir une intensité appréciable à la vue, de telle sorte que la couleur des corps chauffés à des températures de plus en plus élevées part du rouge pour tendre vers le blanc en passant par l'orange et le jaune. Le blanc est en effet la couleur propre aux corps extrêmement chauds comme le soleil.

Les corps non noirs ont une loi d'accroissement différente de celle des corps noirs, parce que le pouvoir émissif varie avec la température. Il augmente inégalement pour les diverses radiations, de sorte que la couleur des corps, par rapport à la couleur d'un corps noir, change avec la température.

Le tableau suivant donne pour différentes couleurs le rapport des valeurs des pouvoirs émissifs de quelques corps, à celui d'un corps noir; la radiation rouge a été observée à travers un verre contenant du cuivre, la verte à l'aide d'un verre au chrome et au cuivre, la bleue à travers une dissolution ammoniacale d'hydrate cuivrique. La matière recouvrait la soudure d'un couple thermo-électrique; elle était sillonnée par des fissures,

et c'est l'éclat du fond de ces fissures qui a été comparé à celui de la surface.

		R. rouge	R. verte	R. bleue
Magnésie	à 1300°	0,10	0,15	0,20
	à 1550°	0,30	0,35	0,40
Chaux.	à 1200°	0,05	0,10	0,10
	à 1700°	0,60	0,40	0,60
Oxyde de chrome.	à 1200°	1,00	1,00	1,00
	à 1700°	1,00	0,40	0,30
Oxyde de thorium.	à 1200°	0,50	0,50	0,70
	à 1760°	0,60	0,50	0,35
Oxyde de cérium.	à 1200°	0,8	1,0	1,0
	à 1700°	0,9	0,9	0,85
Mélange Auer . .	à 1200°	0,25	0,40	1,0
	à 1700°	0,50	0,80	1,0

L'estimation de la température, d'après les mesures des radiations, peut au moins, en théorie, se faire de trois façons différentes, en utilisant :

L'intensité totale de la radiation lumineuse ;

L'intensité d'une radiation de longueur d'onde déterminée ;

L'intensité relative des radiations de longueurs d'onde déterminées.

Mesure de l'intensité totale de la radiation. — L'éclat des corps augmente très rapidement avec la température. On peut à la vue estimer comparativement cet éclat, mais cette mesure est très incertaine faute de points de repère. La sensibilité de l'œil varie, en effet, avec les individus, avec la lumière dans laquelle l'œil s'est trouvé préalablement, et avec la fatigue qui en résulte. On ne peut pas non plus employer de procédés photométriques précis par comparaison avec une source étalon, à cause du changement de nuance avec la température.

Le procédé suivant pourrait être essayé : tracer sur une surface blanche, diffusante ou translucide, des traits d'intensité et de dimensions déterminées, et chercher quelle fraction de la lumière il faut employer pour cesser de voir la distinction des traits. Les indications seront encore assez variables et dépendront du degré de fatigue de l'œil.

On peut donc dire qu'il n'existe actuellement pour l'estimation des températures aucune méthode définie basée sur l'appréciation de l'intensité totale des radiations visibles.

Mesure de l'intensité d'une radiation simple. — On peut estimer la température d'un corps d'après l'intensité d'une de ses radiations pourvu que l'on connaisse le pouvoir émissif du corps à cette température et la loi de variation de cette radiation repérée par rapport au thermomètre à air.

Le pouvoir émissif varie avec la température, et il n'est généralement pas connu. Il semblerait que cela dût faire rejeter cette méthode et les méthodes semblables par radiation. Il n'en est rien pour les raisons suivantes :

1° Aux températures supérieures à la fusion du platine, il n'y a pas d'autres méthodes pyrométriques applicables ;

2° Un grand nombre de corps ont un pouvoir émissif considérable, voisin de l'unité, et particulièrement des corps très intéressants industriellement, comme le fer et le charbon ;

3° La loi de variation du rayonnement avec la température est assez rapide pour que les erreurs commises en négligeant le pouvoir émissif soient faibles. Ainsi, à 1 000°, le rayonnement de la radiation rouge émise par

le charbon quadruple pour un intervalle de 100° ; il double à 1 500° pour le même intervalle de température.

Or, en dehors de quelques corps exceptionnellement blancs, les pouvoirs émissifs aux températures élevées sont supérieures à 0,5. En les prenant égaux à 0,75, on ne commettra, au plus, qu'une erreur de 50° à 25° pour les températures usuelles comprises entre 1 000° et 1 500°.

Pyromètre optique de M. H. Le Chatelier. — Ed. Becquerel avait proposé, en 1864, de ramener la mesure des températures élevées à la mesure de l'intensité des radiations rouges émises par les corps incandescents ; mais cette méthode n'avait jamais été réalisée d'une façon complète, et encore moins employée. M. Le Chatelier, reprenant la question, a établi un dispositif expérimental approprié à ces mesures et déterminé la *loi de radiation* des corps en fonction de la température.

Photomètre. — Pour ces mesures, il faut un appareil photométrique qui permette, non pas comme les photomètres usuels de mesurer l'éclairement total produit par une source, éclairement qui varie avec les dimensions de cette source, mais l'éclat intrinsèque de chaque unité de surface. On peut employer un photomètre reposant sur un principe dû à M. Cornu.

L'appareil (fig. 32 et 33) consiste essentiellement en une lunette qui porte fixée latéralement une petite lampe de comparaison. L'image de la flamme de cette lampe est projetée sur un miroir à 45° placé au foyer principal de la lunette. On ramène à l'égalité d'intensité les images de l'objet qu'on vise et de la flamme de comparaison, qui se trouvent ainsi juxtaposées.

La lunette comprend un objectif en avant duquel se

trouve un œil-de-chat qui permet de faire varier l'ouverture utile de cet objectif, et au delà une monture destinée à recevoir des verres absorbants foncés.

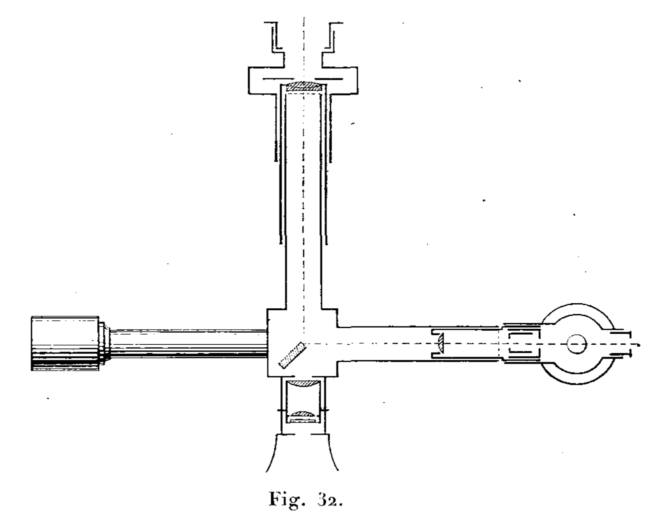


Fig. 32.

Au foyer de l'objectif se trouve un miroir à 45° M qui

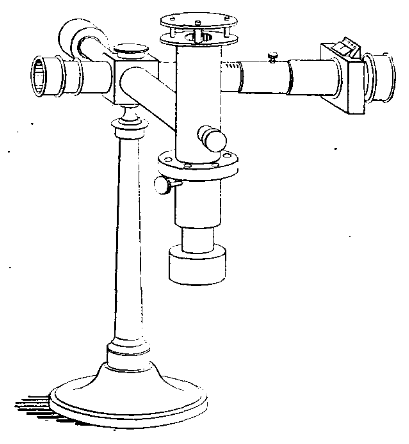


Fig. 33.

réfléchit l'image de la lampe projetée par une lentille intermédiaire. Un oculaire, devant lequel est placé

à poste fixe un verre monochromatique, sert à observer les images de la flamme et de l'objet.

Contre la lampe est fixé un diaphragme rectangulaire qui arrête les rayons lumineux non utilisés et qui porte une monture destinée à recevoir des verres absorbants foncés.

L'arête de miroir à 45° est dans le plan de l'image de la source étudiée, de telle sorte que l'image réfléchie et l'image directe sont juxtaposées, séparées seulement par l'arête du miroir. Ce miroir, d'après un procédé imaginé par M. Cornu, est formé par une lame de verre noir coupée au diamant, ce qui donne une arête très fine.

Pour faire varier l'intensité relative des images, on emploie donc simultanément des verres foncés placés devant l'un ou l'autre des deux objectifs, et l'œil-de-chat précité. Une vis permet de faire varier l'ouverture de cet œil-de-chat, et une graduation convenable indique les dimensions de cette ouverture.

Il est très important que les verres foncés aient un pouvoir absorbant aussi régulier que possible et ne présentent pas de bandes d'absorption. On y arrive avec les verres fumés de fabrication ancienne (CuO, Fe^2O^3, MnO^2) ; on emploie aujourd'hui pour la fabrication de ces verres les oxydes de nickel et de cobalt qui donnent des bandes d'absorption.

Pour déterminer le pouvoir absorbant de ces verres, on fait une mesure avec et sans l'un d'eux ; le rapport du carré des ouvertures de l'œil-de-chat donne le pouvoir absorbant.

Comme écrans monochromatiques, on peut employer :

1° Le verre rouge au cuivre qui laisse passer $\lambda = 659$ environ. C'est celui qui est préférable, parce qu'il est plus monochromatique et qu'il permet de faire des

mesures à basse température, les premières radiations émises étant rouges ;

2° Le verre vert ($\lambda = 546$ environ). Les mesures sont alors plus faciles que dans le rouge, mais elles ne peuvent commencer qu'à des températures plus élevées ;

3° La liqueur ammoniacale d'oxyde de cuivre ($\lambda = 640$ environ).

L'emploi de ce dernier écran, qui est peu monochromatique, est sans intérêt ; l'œil est peu sensible aux radiations bleues, et celles-ci ne deviennent un peu intenses qu'aux températures élevées.

Réglage de l'appareil. — Il y a, dans l'appareil, deux parties qui exigent un réglage très soigné pour assurer son bon fonctionnement, et doivent, par suite, pouvoir être modifiées pour obtenir le résultat voulu.

1° Le faisceau lumineux provenant de la lampe qui est réfléchi par le miroir et celui qui vient directement de l'objet visé doivent pénétrer intégralement dans l'œil. Cette condition est remplie si les images des deux objectifs données par l'oculaire se superposent entre elles.

On le vérifie en visant avec une loupe ces deux images qui viennent se former un peu en arrière de l'anneau oculaire. Il faut, bien entendu, pour les rendre visibles, éclairer les deux objectifs, l'un avec la lampe, l'autre avec une source lumineuse quelconque. Si la superposition n'existe pas, on le rétablit par tâtonnement en agissant sur les vis qui fixent le miroir. S'il ne reçoit pas de chocs, l'appareil doit rester indéfiniment réglé ;

2° La lampe de comparaison demande, pour donner une lumière constante, certaines précautions. Autant que possible, il faut toujours employer la même essence

de pétrole. La flamme doit avoir une hauteur constante, égale, par exemple, à la fenêtre du diaphragme rectangulaire placé devant la flamme. Son image doit être exactement coupée en deux par l'arête du miroir, résultat qu'on obtient en faisant tourner la lampe dans sa monture qui est excentrée (fig. 34).

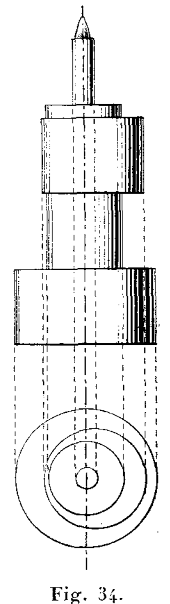


Fig. 34.

Il faut enfin, avant de faire une mesure, attendre une dizaine de minutes que la lampe ait pris un échauffement normal ; c'est alors seulement que la flamme présente un éclat constant.

Mesures. — Pour faire une mesure, on vise un corps pris comme étalon, soit la flamme d'une bougie stéarique, soit la flamme d'une lampe à essence ; on note :

1° n_0, le nombre des verres absorbants ;

2° d_0, l'ouverture de l'œil-de-chat ;

3° f_0, le tirage de l'objectif pour la mise au point.

On procède de même pour la source à étudier, et on trouve les nombres n_1, d_1, f_1.

k étant le coefficient d'absorption des verres foncés, on a :

$$\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{i}} = \frac{1}{k}^{(n_1 - n_0)} \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^2 \left(\frac{f_1}{f_0}\right)^2.$$

Pour les verres actuels, le coefficient d'absorption a les valeurs suivantes :

$k = \frac{1}{11}$ correspondant à $\lambda = 659$

$k = \frac{1}{7}$ — $\lambda = 546$

$k = \frac{1}{10}$ — $\lambda = 460$

Pour les objets très petits que l'on doit voir de très près, on place un objectif supplémentaire en avant de la lunette : l'objet est placé au foyer principal de cette nouvelle lentille, l'objectif de l'appareil étant laissé réglé sur l'infini. On comptera $\frac{1}{10}$ pour le pouvoir absorbant supplémentaire de cet objectif.

Détails d'une expérience. — La première opération à faire sera la détermination du coefficient d'absorption des verres absorbants. Pour cela, on visera un objet d'intensité appropriée en interposant ou non le verre foncé devant l'œil-de-chat. Soient N l'ouverture de l'œil-de-chat sans verre foncé et N' l'ouverture avec un semblable verre. Le coefficient d'absorption K sera :

$$K = \left(\frac{N'}{N}\right)^2$$

Les expériences suivantes nous ont permis de déterminer les pouvoirs absorbants de différents verres employés au cours d'études relatives à la radiation des manchons à incandescence.

VERRE ABSORBANT PLACÉ DEVANT LA SOURCE A ÉTUDIER

TEMPÉRATURE	OUVERTURE DE L'ŒIL-DE-CHAT		
	Rouge.	Vert.	Bleu.
1 270° (+ 1 verre) 1 270° (sans verre)	19,5 5,5	21,2 7,9	35 11,1
	$k_r = 12,5$	$k_v = 7,2$	$k_b = 9,9$

VERRE ABSORBANT PLACÉ DEVANT LA LAMPE ÉTALON

TEMPÉRATURE	OUVERTURE DE L'ŒIL-DE-CHAT		
	Rouge.	Vert.	Bleu.
1 170° (— 1 verre)	2,9	5,95	10,2
1 170° (sans verre)	9,4	16,1	31,5
	$k_r = 10,5$	$k_v = 7,3$	$k_b = 9,5$

Pouvoir émissif. — Avant de pouvoir établir la relation qui existe entre l'intensité de la radiation des corps incandescents et leur température, il faut connaître le pouvoir émissif de ces corps. Pour cette mesure, on utilise la remarque précédemment faite que l'intérieur des fissures d'un corps peut être considéré comme renfermé dans une enveloppe de température uniforme. Le pouvoir émissif est donc, à la température considérée, égal au rapport de l'intensité lumineuse de la surface à celle du fond des fissures profondes, sous la réserve, bien entendu, que l'ouverture des fissures soit assez petite.

Le corps à étudier était placé à l'état de pâte, aussi sèche que possible, sur l'extrémité du couple préalablement aplatie, de manière à prendre la forme d'un disque de 2 à 3 millimètres de diamètre. On séchait très lentement afin qu'il n'y eût pas boursouflement de la masse, et on obtenait ainsi un enduit présentant des fissures ; on se trouvait donc dans les conditions indiquées plus haut. L'extrémité du couple ainsi préparé était chauffée soit avec un bec Bunsen, soit avec le chalumeau oxhydrique, et tandis que d'un côté, on notait

la température à laquelle la soudure était portée, de l'autre, on visait avec le pyromètre optique. Pour obtenir une température aussi constante que possible, il faut se mettre à l'abri des courants d'air et employer une flamme un peu volumineuse.

Voici quelques résultats obtenus :

I. — COUPLE RECOUVERT DU MÉLANGE CONTENANT 99 PARTIES DE THORIUM ET 1 DE CÉRIUM

TEMPÉRATURES	ROUGE		VERT		BLEU	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
950° (— 1 verre)	16,0	»	21,0	14,0	23,0	»
1 170°	15,5	9,0	11,0	9,0	12,0	12,0
1 375°	7,0	3,0	4,5	3,2	3,5	3,5
1 525°	3,2	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
1 650° (+ 1 verre)	8,3	6,0	5,0	»	4,0	»

II. — MAGNÉSIE

TEMPÉRATURES	ROUGE		VERT		BLEU	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
1 340° (— 1 verre)	12,2	4,0	18,5	6,7	19,0	9,0
1 460° (— 1 verre)	4,9	2,5	8,2	3,1	7,7	4,1
1 540° (— 1 verre)	2,4	1,3	3,1	1,8	3,2	2,1

Les nombres donnent les divisions de l'œil-de-chat; ceux de la colonne (1) sont relatifs à la surface et ceux de la colonne (2) au fond des fissures. Les indications — 1 verre et + 1 verre signifient que le verre absorbant est placé, soit devant la lampe étalon, soit devant la source étudiée.

Mesures d'intensité. — Le tableau suivant donne une idée de l'ordre de grandeur des intensités de différentes sources lumineuses, les mesures d'éclat ayant été faites dans le rouge. L'unité est l'éclat de la partie axiale d'une flamme de bougie stéarique.

Charbon s'allumant, rouge naissant (600°) .	0,0001
Argent fondant (950°).	0,015
Bougie stéarique.	1
Bougie gaz	1
Lampe acétate d'amyle.	1
Lampe Pigeon, à essence minérale.	1,1
Bec Argand, avec verre.	1,9
Bec Auer.	2,05
Fe^3O^4 fondant (1350°)	2,25
Palladium fondant (1550°).	4,8
Platine fondant (1780°)	15
Lampe à incandescence.	40
Cratère de l'arc électrique	10 000
Soleil à midi.	90 000

Graduation. — M. Le Chatelier a fait une première graduation du pyromètre optique, en mesurant l'éclat d'oxyde de fer chauffé sur la soudure d'un couple thermo-électrique, et en admettant que, pour le rouge, le pouvoir émissif de ce corps est égal à l'unité. Il a trouvé une loi de variation de l'intensité des radiations rouges en fonction de la température, qui est bien représentée par la formule :

$$I = 10^{6,7} . T^{-\frac{3\,210}{T}}$$

dans laquelle l'unité d'intensité correspond à la région axiale la plus brillante de la flamme d'une bougie. (T est la température absolue.)

Le tableau ci-dessous donne, de 100° en 100°, l'intensité des radiations rouges émises par les corps d'un pouvoir émissif égal à l'unité. Ces nombres ont été cal-

culés au moyen de la formule d'interpolation donnée plus haut.

Intensités.	Températures.	Intensités.	Températures.
0,00008	600°	39,0	1 800°
0,00073	700	60,0	1 900
0,0046	800	93,0	2 000
0,020	900	1 800	3 000
0,078	1 000	9 700	4 000
0,24	1 100	28 000	5 000
0,64	1 200	56 000	6 000
1,63	1 300	100 000	7 000
3,35	1 400	150 000	8 000
6,7	1 500	224 000	9 000
12,9	1 600	305 000	10 000
22,4	1 700		

Ces données sont résumées dans la courbe de la figure 35.

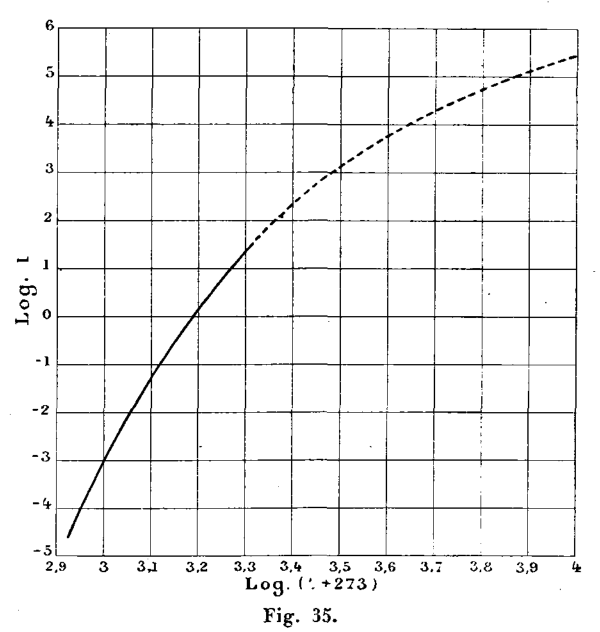


Fig. 35.

On peut, après avoir déterminé, comme il a été dit

plus haut, la valeur du diaphragme d_0 qui amène à égalité l'éclat de la flamme de la bougie étalon avec celui de la lampe de comparaison et le pouvoir absorbant k des verres foncés, dresser une table qui donne directement la température correspondant à chaque ouverture de l'œil-de-chat.

Avec un appareil pour lequel

$$d_0 = 5,2 \qquad k = \frac{1}{11},$$

on obtient la table suivante, dans laquelle on a affecté du signe + les verres foncés placés devant l'objectif, et du signe — ceux placés devant la lampe.

TEMPÉRATURES	OUVERTURE DE L'ŒIL-DE-CHAT				
	— 2 verres.	— 1 verre.	0 verre.	+ 1 verre.	+ 2 verres
degrés.					
700	17,3	»	»	»	»
800	6,9	23,0	»	»	»
900	»	11,0	»	»	»
1 000	»	5,6	18,6	»	»
1 100	»	»	10,5	»	»
1 200	»	»	6,5	»	»
1 300	»	»	4,0	13,6	»
1 400	»	»	»	9,4	»
1 500	»	»	»	6,6	»
1 600	»	»	»	4,8	»
1 700	»	»	»	3,6	12,0
1 800	»	»	»	»	9,1
1 900	»	»	»	»	7,3
2 000	»	»	»	»	5,9

Cette graduation s'applique à tous les corps placés dans une enceinte de même température, à l'intérieur des fours par exemple, et aux corps noirs, quelle que soit la température de l'enceinte qui les environne, par exemple à un morceau de fer rouge exposé à l'air libre. Pour les corps dont le pouvoir émissif est inférieur à

l'unité comme le platine, la magnésie, la chaux, il faut, lorsqu'ils sont exposés à l'air libre et ne sont plus renfermés dans une enceinte de même température, faire une graduation spéciale.

MM. Le Chatelier et Boudouard ont fait une série de mesures sur des radiations de longueurs d'ondes différentes. La soudure d'un couple thermo-électrique était placée dans un petit tube de platine, pour se rapprocher d'une enceinte close. En prenant comme unité l'éclat du platine fondant, les résultats trouvés ont été les suivants pour les radiations rouges, vertes et bleues :

t	Log (t + 273).	I_r	Log I_r	I_v	Log I_v	I_b	Log I_b
900	3,0707	0,0009	$\bar{4},95$	0,00018	$\bar{4},25$	0,00002	$\bar{5},3$
1 180	3,161	0,0024	$\bar{3},88$	0,0087	$\bar{3},94$	0,0015	$\bar{3},17$
1 275	3,190	0,075	$\bar{2},78$	0,037	$\bar{2},57$	0,013	$\bar{2},11$
1 430	3,230	0,23	$\bar{1},36$	0,16	$\bar{1},20$	0,058	$\bar{2},76$
1 565	3,265	0,72	$\bar{1},86$	0,47	$\bar{1},67$	0,24	$\bar{1},38$
1 715	3,300	1,69	0,23	1,45	0,16	0,9	$\bar{0},95$

Evaluations de températures. — Enfin M. Le Chatelier a employé son pyromètre optique pour déterminer les températures les plus élevées réalisées dans quelques-uns des phénomènes les plus importants de la nature ou de l'industrie. Les résultats assez différents des estimations faites antérieurement furent d'abord accueillis avec un certain scepticisme ; ils sont aujourd'hui admis comme exacts au moins dans les limites de précision qu'ils comportent. Voici quelques-uns de ces chiffres :

Fours Siemens-Martin	1 490 à 1 580
Fours de verrerie	1 375 à 1 400
Fours à porcelaine dure	1 370
— nouvelle.	1 250

Lampe à incandescence	1800
Lampe à arc	4100
Soleil	7600

Cette détermination de la température du Soleil a été confirmée par les expériences plus récentes de MM. Wilson et Gray par une méthode toute différente (p. 151).

Une série de mesures ont été faites avec le même appareil dans les usines à fer. Voici quelques résultats.

Haut fourneau pour fonte Bessemer.

Creuset devant les tuyères	1930°
Coulée de la fonte. Commencement	1400
— — Fin	1520

Cornue Bessemer.

Coulée de la scorie	1580
Coulée de l'acier dans la poche	1640
— dans les lingotières	1580
Réchauffage du lingot	1200
Fin du martelage	1080

Fours Siemens-Martin.

Coulée de l'acier dans la poche. Commencement	1580
Coulée de l'acier dans la poche. Fin	1420
Coulée dans les moules	1490

Conditions d'emploi. — Le pyromètre optique, en raison de l'incertitude sur les pouvoirs émissifs, du peu de sensibilité de l'œil pour les comparaisons d'intensité lumineuse, ne peut pas conduire à des résultats aussi précis que les autres méthodes pyrométriques. Son emploi doit être limité aux cas où ces autres méthodes se trouvent nécessairement en défaut ; par

exemple, dans le cas de corps en mouvement comme un rail passant au laminoir ; dans le cas de températures très élevées supérieures à la fusion du platine comme celle du creuset du haut fourneau ou celle du four électrique ; dans le cas de corps isolés rayonnant librement dans l'air comme des flammes carbonées ou des fils chauffés par le courant électrique que l'on ne pourrait toucher sans modifier leur température.

Elle est encore commode dans le cas de fours fortement chauffés comme les fours à acier, à porcelaine. Mais pour cet usage il faut se garder contre l'éclat des flammes toujours plus chaudes que le four et contre les rentrées d'air froid. Le dispositif du tube fermé indiqué à propos du pyromètre à radiation calorifique est indispensable si l'on veut arriver à des résultats à peu près exacts. Comparativement à ce dernier pyromètre, le pyromètre optique a l'avantage d'être beaucoup plus simple et moins coûteux, de n'exiger aucune installation préalable à poste fixe. Il a, par contre, l'inconvénient d'exiger une intervention plus active de l'opérateur et de pouvoir difficilement être confié à un ouvrier, tandis que l'on conçoit une organisation du pyromètre à radiation calorifique telle que toute l'observation se réduise à une lecture sur un cadran.

Mesure de l'intensité relative de radiations différentes. — C'est sur ce principe que repose l'estimation à l'œil des températures telle que la font les ouvriers dans les usines. De nombreuses tentatives, peu heureuses d'ailleurs, ont été faites pour transformer cette méthode et lui donner de la précision. Il n'y a lieu de s'en occuper qu'au point de vue du contrôle sommaire de la marche des fours dans l'industrie.

a. *Emploi de l'œil.* — Pouillet a fait un repérage de

la couleur des corps incandescents par rapport au thermomètre à air. Le tableau qu'il a dressé se trouve aujourd'hui encore reproduit partout :

Rouge naissant. .	525°	Orange foncé. . .	1 100°
— sombre . .	700	— clair . . .	1 200
Cerise naissant. .	800	Blanc	1 300
— pp. dit . .	900	— soudant . .	1 400
— clair . . .	1 000	— éblouissant.	1 500

L'estimation de ces nuances, très arbitraire, varie d'une personne à l'autre; bien plus, elle varie pour une même personne avec l'éclairement extérieur. Le jour et la nuit, les nuances sont différentes : c'est ainsi que la flamme du gaz, jaune pendant le jour, paraît blanche la nuit.

b. *Emploi du verre de cobalt.* — On peut exagérer les changements de nuance en supprimant du spectre les radiations centrales, le jaune et le vert par exemple, pour ne conserver que le rouge et le bleu. Les variations relatives de deux nuances sont d'autant plus grandes qu'elles sont plus éloignées dans le spectre ; or, le rouge et le bleu forment les deux extrémités du spectre visible.

On a proposé dans ce but l'emploi du verre de cobalt qui arrête le jaune et le vert, mais laisse passer le rouge et le bleu. Il faut remarquer tout d'abord que le rapport des radiations transmises varie avec l'épaisseur du verre, en même temps que leur intensité absolue.

Soient I_a et I_b les intensités des radiations émises, k_a et k_b les proportions transmises par le verre à travers une épaisseur 1. A travers une épaisseur e, la proportion transmise sera

$$\frac{I_a\, k_a^e}{I_b\, k_b}$$

qui variera avec e toutes les fois que k_a sera différent de k_b.

Il en résulte que deux verres de cobalt, différant comme épaisseur ou teneur en cobalt, ne donneront pas les mêmes résultats. Si donc on casse son verre habituel, tout l'apprentissage de l'œil qu'il a fallu faire sera perdu.

En outre, le cobalt a l'inconvénient de ne pas avoir un assez grand pouvoir absorbant pour le rouge, qui prédomine aux températures les plus usuelles que nous produisons. Il serait possible, sans doute par addition d'oxyde de cuivre, d'augmenter le pouvoir absorbant pour le rouge.

On aurait des résultats meilleurs et plus comparables en employant des solutions de sels métalliques ou de composés organiques convenablement choisis. Mais peu d'essais ont été faits dans cette voie.

Lunette de MM. Mesuré et Nouel. — On sait qu'en plaçant entre deux nicols une lame de quartz perpendiculaire à l'axe on supprime un certain nombre des radiations du spectre. Celui-ci est alors composé de bandes sombres dont l'espacement dépend de l'épaisseur du quartz et la position de l'angle des nicols. MM. Mesuré et Nouel ont utilisé ce principe pour supprimer les parties centrales du spectre ; cette solution est excellente et préférable à l'emploi des milieux absorbants. L'appareil comprend essentiellement (fig. 36) un polariseur P et un analyseur A dont le réglage à l'extinction donne le zéro de la graduation du cercle divisé C C. Ce cercle est divisé en degrés et est mobile devant un index fixe I. Entre les deux nicols P et A, se trouve un quartz Q, d'épaisseur convenable, bien calibré. La monture M permet son enlèvement rapide, si on avait à vérifier le

réglage des nicols P et A. Le quartz Q est taillé perpendiculairement à l'axe.

Une loupe L vise l'ouverture opposée C garnie d'une glace parallèle, ou à volonté, d'un verre diffusant dépoli très doux.

Les proportions relatives de divers rayons qu'émet

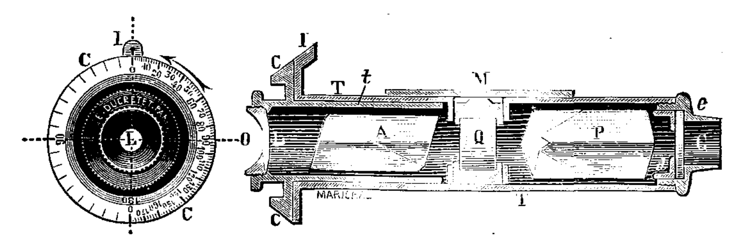


Fig. 36.

un corps incandescent variant avec la température, il s'ensuivra que, pour une position donnée de l'analyseur A, la teinte composée obtenue sera différente suivant cette température.

Lorsqu'on fait tourner l'analyseur pendant que l'on regarde un corps lumineux donné, on constate que les variations des colorations sont beaucoup plus rapides dans une position déterminée de l'analyseur. Une très faible rotation fait brusquement passer la coloration du rouge au vert. Or, si on laisse l'analyseur fixe, une faible variation de la température du corps incandescent produit le même effet. La teinte transitoire rouge-vert constitue ce que l'on appelle la teinte sensible. Il y a alors deux bandes d'absorption, une dans le jaune et une dans le violet.

On peut employer cet appareil de deux façons différentes. Ou bien fixer d'une façon invariable l'analyseur dans une position qui donne la teinte sensible pour la température que l'on a le plus d'intérêt à surveiller et

observer les changements de nuances qui se produisent quand la température viendra à s'écarter de la température type dans un sens ou dans l'autre. C'est le mode normal d'emploi de cet appareil. On veut dans une fabrication donnée (verre, acier) s'assurer que la température des fours reste bien toujours la même, on réglera une fois pour toutes la lunette, pour cette température. Il suffira d'un apprentissage peu prolongé de l'œil pour saisir le sens des changements de nuances.

Les inventeurs ont cherché à faire de leur appareil un instrument de mesure ; cette idée est très discutable. En théorie, cela est facile, il suffit, au lieu de laisser l'analyseur fixe, de le faire tourner jusqu'à l'obtention de la teinte sensible et de noter l'angle qui définit la position de l'analyseur. Mais en fait, la nuance sensible n'est pas rigoureusement déterminée et varie suivant les observateurs. Une graduation faite par un observateur ne sera pas bonne pour un autre Il n'est même pas sûr que le même observateur choisisse toujours de même la teinte sensible. A chaque température la teinte sensible est un peu différente, et il est impossible de conserver le souvenir dans toute l'échelle des températures des teintes que l'on a choisies le jour de la graduation. Il y a déjà une certaine difficulté à se la rappeler, pour une température unique.

Les chiffres suivants donneront une idée des écarts qui peuvent exister entre deux opérateurs sur la position de la teinte sensible.

		Angle de l'analyseur.	
		1	2
Soleil	8000°	84	86
Flamme du gaz.	1680	65	70
Platine rouge	800	40	45

Les erreurs sur l'estimation des températures qui

résulteraient de l'incertitude de la nuance sensible dépasseraient alors 100°. Avec des observateurs ayant fait un apprentissage plus prolongé, l'écart serait un peu réduit, mais il resterait toujours assez grand.

Pyromètre de M. Crova. — M. Crova a cherché à donner à la méthode d'estimation des températures reposant sur la variation inégale des diverses radiations du spectre une précision scientifique en mesurant l'intensité absolue de chacune des deux radiations utilisées ; mais cette méthode, au point de vue pratique, ne semble pas avoir donné de résultats plus exacts que les précédentes.

L'œil est beaucoup moins sensible aux différences d'intensité qu'aux différences de nuance, de sorte qu'il n'y a aucun avantage à passer par des mesures d'intensité.

M. Crova compare deux radiations

$$\lambda = 676 \text{ (rouge)}$$
$$\lambda = 523 \text{ (vert)}$$

venant de l'objet étudié et d'une lampe à huile servant d'étalon. Pour cela, au moyen d'un diaphragme variable, il amène à égalité l'une des deux radiations émanant de chacune des sources, et mesure ensuite le rapport des intensités de l'autre radiation.

L'appareil est un spectrophotomètre. Devant la moitié de la hauteur de la flamme se trouve un prisme à réflexion totale qui renvoie la lumière d'un verre dépoli éclairé par les radiations d'une lampe à huile ayant au préalable traversé deux nicols et un diaphragme d'une ouverture variable. Sur l'autre moitié de la fente, on projette avec une lentille l'image du corps étudié.

Avant d'employer l'appareil, il faut régler les limites

extrêmes du déplacement du spectre de façon à projeter successivement sur la fente, au foyer de l'oculaire, les deux radiations choisies ($\lambda = 676$ et $\lambda = 523$). Pour cela, on interpose entre les deux nicols croisés un quartz de 4 millimètres qui rétablit l'éclairement ; pour éteindre à nouveau, on doit faire tourner l'analyseur de 115°38′ pour $\lambda = 523$, et de 65°52′ pour $\lambda = 676$. On règle alors l'excursion extrême de la lunette de façon à ce que la bande sombre produite par le quartz arrive au milieu de la fente oculaire.

L'appareil ainsi réglé, pour faire une mesure aux basses températures, inférieures à celles du charbon brûlant dans la lampe étalon, on amène à égalité la radiation rouge avec le diaphragme, puis sans toucher de nouveau au diaphragme, on ramène le vert à l'égalité en faisant tourner le nicol.

Le degré optique est donné par la formule $N = 1\,000 \cos^2\alpha$, en désignant par α l'angle des deux sections principales des nicols.

Pour les températures plus élevées, on renverse l'opération ; on amène d'abord le vert à l'égalité par le diaphragme, puis le rouge à l'égalité par une rotation de l'analyseur. Le degré optique est alors donné par la formule $N = \frac{1\,000}{\cos^2\alpha}$, et la rotation variant de 0° à 90°, les degrés optiques varient de 1 000° à l'infini.

Cette méthode, qui est excellente au point de vue théorique, présente de graves inconvénients au point de vue pratique :

1° Défaut de précision des mesures. En admettant une erreur de 10 p. 100 sur chacune des mesures relatives aux radiations rouge et verte, l'erreur totale possible sera de 20 p. 100 ; or, entre 700° et 1 500°, les rapports d'intensités varient de 1 à 5 ; cela conduit à un écart de $\frac{1}{25}$ sur 800°, soit 32°.

2° Complication et lenteur des expériences. Il est difficile d'arriver à viser exactement le corps ou le point du corps que l'on veut étudier. La mise en expérience et l'achèvement des mesures demande parfois près d'une demi-heure.

3° Absence de repérage par rapport au thermomètre à air.

Le motif *a priori* qui avait conduit à l'étude de cette méthode était la supposition, qu'en général, le pouvoir émissif des corps était le même pour toutes les radiations, et que par suite, son influence disparaîtrait en prenant le rapport des intensités des deux radiations. Les mesures du pouvoir émissif données plus haut prouvent que cette hypothèse est le plus souvent inexacte.

CHAPITRE IX

PYROMÈTRE PAR RETRAIT (Wedgwood)

Le pyromètre de Wedgwood, le plus ancien en date parmi les instruments semblables, ne présente plus guère aujourd'hui qu'un intérêt historique, car son emploi a été presque partout abandonné. Il utilise le retrait permanent que prennent les matières argileuses sous l'influence d'une température élevée.

Ce retrait est variable suivant la nature chimique de la pâte, la grosseur des éléments, la compacité de la pâte humide, la durée du chauffage, etc. Pour avoir des résultats comparables, il faudrait préparer *simultanément*, *dans les mêmes conditions*, une grande quantité de cylindres, dont on ferait un repérage par rapport au thermomètre à air. Wedgwood employait des cylindres d'argile réfractaire, cuits jusqu'à déshydratation, soit 600° ; cette cuisson préalable est indispensable, si l'on veut éviter l'éclatement, quand on les soumet à l'action brusque du feu. Ces cylindres présentent une face plane, sur laquelle on les appuie dans l'appareil de mesure de façon à les présenter toujours dans le même sens (voir la figure en tête du volume). Le retrait est mesuré au moyen d'une jauge formée de deux parois inclinées ; deux jauges semblables de 6 pouces de long se faisant suite sont placées l'une à côté de l'autre ; à une extrémité, elles ont un écart maximum

de $\frac{5}{10}$ de pouce, et à l'autre un écart minimum de $\frac{3}{10}$ de pouce. Longitudinalement, les divisions ont $\frac{1}{20}$ de pouce ; chaque division vaut $\frac{1}{240}$ de $\frac{2}{10}$ de pouce, soit $\frac{1}{1200}$ de pouce, ce qui correspond à un retrait relatif par rapport à la dimension primitive de $\frac{1}{1200} : \frac{5}{10} = \frac{1}{600}$.

On a donc la corrélation suivante entre les degrés Wedgwood et le retrait linéaire par unité de longueur.

Wedgwood .	0	30	60	90	120	150	180	210	240
Retrait . . .	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40

M. H. Le Chatelier a fait des expériences pour repérer les degrés du pyromètre Wedgwood par rapport à l'échelle du thermomètre à air en employant des matières argileuses de nature différente, et tout d'abord des cylindres provenant d'un vieux pyromètre Wedgwood de l'École des Mines. La contraction qui accompagne la déshydratation est assez variable avec la nature des pâtes. Dans ces expériences la durée du chauffage a été d'une demi-heure.

Température centigrade. .	600°	800°	1 000°	1 200°	1 400°	1 550°
Wedgwood	0	4	15	36	90	132
Argile de Mussidan . . .	0	2	14	36	78	120
Porcelaine de Limoges. .	0	0	2	21	88	91
Faïence de Choisy-le-Roi.	0	2	5	12	48	75
Faïence de Nevers. . . .	0	0	0	32	fondue	»
Kaolin	0	4	12	15	55	118
Argile . . . . . . 25 / Acide titanique . . 75	0	4	9	19	123	160

On voit combien les indications sont variables ; il est impossible, par suite, de repérer les vieilles mesures de Wedgwood et de ses successeurs, parce que la fabrication des cylindres a varié avec les époques.

Wedgwood avait donné une graduation faite par un procédé d'extrapolation qu'il n'a pas indiqué, graduation d'après laquelle il attribuait 10 000° centigrades à 130° de son pyromètre, qui correspondent environ à 1 550°. On pourrait encore chercher à rétablir la graduation en utilisant les déterminations des points de fusion des métaux faites par Wedgwood, mais les résultats sont trop discordants pour conduire à aucune conclusion bien nette. D'après Wedgwood, le cuivre serait plus fusible que l'argent, le fer ne serait pas très éloigné de l'argent ; il est probable que ces expériences ont porté sur des métaux très impurs, ou tout au moins sur des métaux notablement oxydés avant leur fusion. En tout cas les cylindres qui lui ont servi dans ses premières expériences prenaient un retrait plus grand que ceux du pyromètre de l'Ecole des Mines dont la graduation a été donnée plus haut. On pourrait dubitativement indiquer la graduation suivante pour les mesures faites avec les premiers cylindres employés vers 1780.

Degrés Wedgwood.	0	15	30	100	140
Degrés centigrades.	600	800	1 000	1 200	1 400

La préparation des cylindres était une opération très minutieuse. Moulés en pâte molle ils étaient nécessairement un peu irréguliers. Il fallait après la première cuisson les retoucher pour les amener à une dimension bien uniforme. On obtient aujourd'hui, dans les quelques usines à faïence où ce procédé est encore employé, une régularité bien plus grande en se servant d'une pâte très sèche, 5 p. 100 d'eau par exemple, la moulant sous une forte pression, une centaine de kilogrammes environ par centimètre carré, dans des moules en acier tourné. On augmente la précision des mesures, en augmentant le diamètre, à 50 millimètres par exemple. Il faut en

même temps réduire l'épaisseur à 5 millimètres environ, pour que la compression soit uniforme dans toute la masse.

Cet appareil ne saurait dans aucun cas être recommandé comme un véritable pyromètre, pouvant servir indirectement à évaluer les températures par rapport à l'échelle du thermomètre à air. La graduation en est pénible et ne peut être faite que par l'intermédiaire d'un autre pyromètre ; l'emploi des points fixes ne conviendrait pas pour cette graduation parce que la courbe de retrait de l'argile en fonction de la température est trop irrégulière pour que deux ou trois points suffisent à la déterminer ; dans aucun cas les indications de cet appareil ne présentent une précision notable.

Mais comme simple pyroscope, c'est-à-dire comme appareil destiné à indiquer seulement l'égalité ou l'inégalité de deux températures, le pyromètre de Wedgwood peut être très commode. Il a l'avantage de ne coûter presque rien et il est d'un emploi très simple, à la portée de n'importe quel ouvrier. Il semble particulièrement recommandable pour certaines industries céramiques, dans lesquelles les pâtes courantes de service peuvent servir à confectionner les pièces de retrait. Il faut pour cela que la cuisson normale de ces pâtes s'arrête à une température comprise dans la période de retrait rapide. C'est le cas de la faïence fine et des terres cuites ordinaires. Cela ne conviendrait pas au contraire pour la faïence stannifère ni pour la porcelaine, parce que la cuisson de la première s'arrête avant le commencement du retrait et celle de la seconde après son achèvement.

CHAPITRE X

MONTRES FUSIBLES (Seger)

On a depuis longtemps songé à repérer les températures au moyen des points de fusion de certains métaux et alliages. Mais les métaux non oxydables sont peu nombreux et tous très coûteux : l'argent, l'or, le palladium, le platine. On a cependant employé parfois ces métaux et leurs alliages, en admettant que le point de fusion d'un mélange de deux corps est la moyenne arithmétique des points de fusion des composants, ce qui est tout à fait inexact. L'emploi de ces alliages est avec raison complètement abandonné aujourd'hui.

On pourrait, en s'adressant aux sels métalliques, dont un très grand nombre peuvent être chauffés sans altération constituer une échelle de points de fusion dont l'emploi serait souvent très commode ; mais ce travail n'est pas encore fait, au moins d'une façon suffisamment précise. Aux sels isolés on pourrait ajouter leurs combinaisons définies et leurs mélanges eutectiques qui ont des points de fusion complètement définis. Mais on ne pourrait pas prendre un mélange quelconque de deux sels parce qu'en général la solidification se produit dans un grand intervalle de température et d'une façon progressive.

Au lieu d'utiliser la fusion de corps cristallisés qui passent brusquement de l'état solide à l'état liquide, on

peut se servir du ramollissement progressif des matières vitreuses, c'est-à-dire de mélanges renfermant un excès de l'un des trois acides silicique, borique ou phosphorique. Il est nécessaire dans ce cas d'avoir un procédé précis pour définir un degré type de ramollissement ; on prend un affaissement déterminé d'un prisme de grandeur déterminée. Ces petits prismes formés d'éléments vitreux sont connus sous le nom de *montres fusibles*.

L'idée première de cette méthode appartient à MM. Lauth et Vogt qui l'ont appliquée à la manufacture de Sèvres avant 1882. Mais ils ne lui ont pas donné tout le développement qu'elle comportait ; ils se sont contentés d'établir un petit nombre de montres fusibles correspondant aux diverses températures employées dans la fabrication de la porcelaine de Sèvres.

Seger, directeur d'un laboratoire de recherches céramiques, à la manufacture royale de Berlin, a publié, en 1886, un important mémoire sur cette question. Il a déterminé toute une série de montres fusibles espacées de 25° environ et embrassant l'intervalle de température de 600 à 1 800°. Les matières premières qui entrent dans la composition de ces montres sont essentiellement :

Du sable quartzeux pur ;
Du feldspath de Norvège ;
Du carbonate de chaux pur ;
Du kaolin de Zettlitz.

La composition de ce dernier est

SiO^2	46,9
Al^2O^3	38,6
FeO^3	0,8
Alcalis	1,1
Eau	12,7

Pour obtenir les montres très peu fusibles on ajoute de l'alumine calcinée, et pour les montres très fusibles de l'oxyde de fer, de l'oxyde de plomb, du carbonate de soude et de l'acide borique.

La forme de ces montres (fig. 37) est celle de pyramides triangulaires de 15 millimètres de côté et 50 mil-

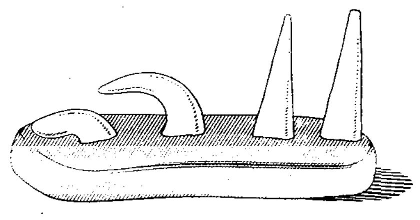


Fig. 37.

limètres de hauteur. Sous l'action de la chaleur, quand le ramollissement commence, elles se contractent d'abord sans changer de forme, puis elles s'inclinent, se courbent en laissant leur pointe se tourner vers le bas et enfin s'aplatissent complètement. On dit que la montre est tombée, c'est-à-dire est fondue, quand elle est à moitié courbée la pointe tournée vers le bas.

Le point de fusion de ces montres a été déterminé à la manufacture de porcelaine de Berlin par comparaison avec le pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier précédemment décrit.

Les montres sont numérotées, pour les moins fusibles qui ont été établies les premières, de 1 à 38 ; cette dernière, la moins fusible, correspond à 1 980°. La seconde série, plus fusible, et établie postérieurement, est numérotée de 01 à 022 ; cette dernière montre, la plus fusible, correspond à 590°.

Si au lieu de se servir des montres de fabrication allemande on veut les fabriquer soi-même en employant les mêmes formules, il est prudent d'en faire une nou-

velle graduation. Les kaolins, les feldspaths de différentes provenances n'ont jamais des compositions exactement semblables, et de très faibles variations dans les teneurs en alcalis peuvent amener des changements notables dans la fusibilité, au moins pour les montres les moins fusibles.

On remarquera que dans un grand nombre de montres la silice et l'alumine sont dans les proportions $Al^2O^3 + 10SiO^2$. Cela tient à ce que ce mélange est le plus fusible que l'on puisse obtenir avec la silice et l'alumine seules. On en est parti pour obtenir les autres montres, les moins fusibles par addition d'alumine, et les plus fusibles par addition de bases alcalines.

Le tableau suivant donne la liste des montres de l'échelle de Seger (voir p. 188).

Ces montres peuvent être classées en une série de groupes dans chacun desquels les compositions des différentes montres dérivent de celle de l'une d'entre elles, généralement de la plus fusible, par addition en proportion variable ou quelquefois substitution d'une autre matière.

Les montres 28 à 38 dérivent de la montre 27 par addition de quantités croissantes d'Al^2O^3.

Les montres 5 à 28 de la montre 5 par addition de quantités croissantes du mélange $Al^2O^3 + 10SiO^2$.

Les montres 1 à 5 de la montre 1 par substitution de quantités croissantes d'alumine au sesquioxyde de fer.

Les montres 010 à 1 de la montre 1 par substitution d'acide borique à la silice.

Les montres 022 à 011 de la montre 022 par addition de quantités croissantes du mélange $Al^2O^3 + 2SiO^2$.

La figure 38 donne la représentation graphique de ces

Nos	TEMPÉRATURES	COMPOSITION	X	FORMULES
	degrés.			
38	1 890	1 Al^2O^3 + 1 SiO^2	9	$x\,Al^2O^3 + (1 - x)(Al^2O^3 + 10\,SiO^2)$
36	1 850	1 » + 1,5 »		
35	1 830	1 » + 2 »	8	
34	1 810	1 » + 2,5 »		
33	1 790	1 » + 3 »		
32	1 770	1 » + 4 »		
31	1 750	1 » + 5 »		
30	1 730	1 » + 6 »		
29	1 710	1 » + 8 »		
28	1 690	1 » + 10 »		
27	1 670	1 $\begin{Bmatrix} 0{,}3\,K^2O \\ 0{,}7\,CaO \end{Bmatrix}$ + 20 $(Al^2O^3 + 10\,SiO^2)$	0	
26	1 650	1 » + 7,2 »	93	$x\,(Al^2O^3 + 10\,SiO^2) + (1 - x)\left[\begin{matrix} 0{,}3\,K^2O \\ 0{,}7\,CaO \end{matrix} + 0{,}5\,(Al^2O^3 + 10\,SiO^2)\right]$
25	1 630	1 » + 6,6 »		
24	1 610	1 » + 6 »		
23	1 590	1 » + 5,4 »		
22	1 570	1 » + 4,9 »		
21	1 550	1 » + 4,4 »		
20	1 530	1 » + 3,9 »		
19	1 510	1 » + 3,5 »		
18	1 490	1 » + 3,1 »		
17	1 470	1 » + 2,7 »		
16	1 450	1 » + 2,4 »	79	
15	1 430	1 » + 2,1 »		
14	1 410	1 » + 1,8 »		
13	1 390	1 » + 1,6 »		
12	1 370	1 » + 1,4 »		
11	1 350	1 » + 1,2 »	58	
10	1 330	1 » + 1 »		
9	1 310	1 » + 0,9 »		
8	1 290	1 » + 0,8 »		
7	1 270	1 » + 0,7 »		
6	1 250	1 » + 0,6 »		
5	1 230	1 » + 0,5 »	0	
4	1 210	1 » + 0,5 Al^2O^3 + 4 SiO^2	1	$x\,(0{,}5\,Al^2O^3 + 4\,SiO^2) + (1 - x)(0{,}5\,Fe^2O + 4\,SiO^2 + 0{,}7\,CaO)$
3	1 190	1 » + $\begin{Bmatrix} 0{,}45\,Al^2O^3 \\ 0{,}05\,Fe^2O^3 \end{Bmatrix}$ + 4 SiO^2		
2	1 170	1 » + $\begin{Bmatrix} 0{,}4\,Al^2O^3 \\ 0{,}1\,Fe^2O^3 \end{Bmatrix}$ + 4 SiO^2		
1	1 150	1 » + $\begin{Bmatrix} 0{,}3\,Al^2O^3 \\ 0{,}2\,Fe^2O^3 \end{Bmatrix}$ + 4 SiO^2		
01	1 130	1 » + » + $\begin{Bmatrix} 3{,}95\,SiO^2 \\ 0{,}05\,B^2O^3 \end{Bmatrix}$	1,05	$\frac{x}{10}\left(SiO^2 - B^2O^3\right) + (1 - x)\left(\begin{matrix} 0{,}3\,K^2O \\ 0{,}7\,CaO \end{matrix} + \begin{matrix} 0{,}3\,Al^2O^3 \\ 0{,}2\,Fe^2O^3 \end{matrix} + 4\,SiO^2\right)$
02	1 110	1 » + » + $\begin{Bmatrix} 3{,}90\,SiO^2 \\ 0{,}10\,B^2O^3 \end{Bmatrix}$		
03	1 090	1 » + » + $\begin{Bmatrix} 3{,}85\,SiO^2 \\ 0{,}15\,B^2O^3 \end{Bmatrix}$		
04	1 070	1 » + » + $\begin{Bmatrix} 3{,}80\,SiO^2 \\ 0{,}20\,B^2O^3 \end{Bmatrix}$		

Nos	TEMPÉRATURES	COMPOSITION	X	FORMULES
	degrés.			
05	1 050	1 » + 1 » + $\begin{cases}3,75\ SiO^2\\0,25\ B^2O^3\end{cases}$	1,25	
06	1 030	1 » + 1 » + $\begin{cases}0,70\ SiO^2\\0,30\ B^2O^3\end{cases}$		$\frac{x}{10}\left(SiO^2 - B^2O^3\right)$
07	1 010	1 » + 1 » + $\begin{cases}3,65\ SiO^2\\0,35\ B^2O^3\end{cases}$		$+ (1-x)\left(\begin{matrix}0,3\ K^2O\\0,7\ CaO\end{matrix} +\right.$
08	990	1 » + 1 » + $\begin{cases}3,60\ SiO^2\\0,40\ B^2O^3\end{cases}$		$\left.\begin{matrix}0,3\ Al^2O^3\\0,2\ Fe^2O^3\end{matrix} + 4\ SiO^2\right)$
09	970	1 » + 1 » + $\begin{cases}3,55\ SiO^2\\0,45\ B^2O^3\end{cases}$		
010	950	1 » + 1 » + $\begin{cases}3,5\ SiO^2\\0,5\ B^2O^3\end{cases}$	5	
011	920	1 $\begin{cases}0,5\ Na^2O\\0,5\ PbO\end{cases}$ + 0,8 Al^2O^3 + $\begin{cases}3,6\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$	0,62	
012	890	1 » + 0,75 » + $\begin{cases}3,5\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		
013	860	1 » + 0,70 » + $\begin{cases}3,4\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		
014	830	1 » + 0,65 » + $\begin{cases}3,3\ SiO^2\\1,0\ B^2O^2\end{cases}$		
015	800	1 » + 0,60 » + $\begin{cases}3,2\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$	0,57	$x(2SiO^2 + Al^2O^3)$
016	770	1 » + 0,55 » + $\begin{cases}3,1\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		$+ (1-x)\left(\begin{matrix}0,5\ Na^2O\\0,5\ PbO\end{matrix} +\right.$
017	740	1 » + 0,50 » + $\begin{cases}3,0\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		$\left.\begin{matrix}2\ SiO^2\\1\ B^2O^3\end{matrix}\right)$
018	710	1 » + 0,40 » + $\begin{cases}2,8\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		
019	680	1 » + 0,30 » + $\begin{cases}2,6\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		
020	650	1 » + 0,20 » + $\begin{cases}2,4\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		
021	620	1 » + 0,10 » + $\begin{cases}2,2\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$		
022	590	1 » + $\begin{cases}2,0\ SiO^2\\1,0\ B^2O^3\end{cases}$	0	

données ; on a porté les températures en ordonnées et en abscisses les valeurs des x du tableau ;

Ces montres fusibles de Seger sont d'un usage général en céramique ; elles sont d'un emploi très commode dans tous les fours intermittents dont la température doit monter constamment jusqu'à un certain maximum à

partir duquel on laisse le refroidissement se faire. Il suffit alors avant la mise en feu de placer un certain

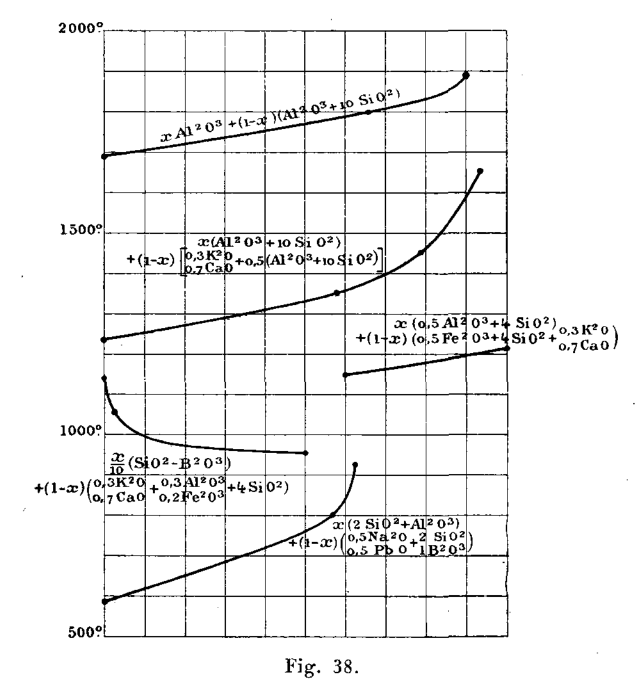


Fig. 38.

nombre de montres fusibles vis-à-vis d'un regard fermé par un verre à travers lequel on peut les suivre. En les voyant successivement tomber, on sait à quel moment le four passe par une série de températures déterminées.

Dans les fours continus on peut encore les introduire dans le four pendant la marche, mais cela est plus délicat. Il faut les placer sur de petits supports en terre cuite que l'on dépose avec une tringle de fer dans un endroit voulu du four. Quand au contraire on les installe par avance dans le four froid, on les colle à leur place avec une petite boulette d'argile.

CHAPITRE XI

PYROMÈTRES ENREGISTREURS

Parmi les différents procédés de mesure des températures élevées, quelques-uns se prêtent à l'enregistrement continu. Cet enregistrement est aussi utile pour les applications industrielles que pour les recherches scientifiques. Dans les laboratoires de recherches, on s'attache autant que possible à effectuer toutes les mesures par des procédés automatiques échappant à l'influence soit des idées préconçues, soit des négligences des observateurs ; dans les usines, l'emploi de procédés semblables donne un contrôle continu du travail des ouvriers que la présence d'aucun surveillant ne saurait remplacer.

L'enregistrement peut se faire au moyen d'une plume écrivante ou par la photographie. Le premier de ces procédés, d'un maniement plus simple, est préférable dans les usines ; le second, dont les indications sont plus précises, est préférable dans les laboratoires. Mais le plus souvent, on n'a pas le choix, chaque phénomène utilisé dans les mesures ne se prêtant généralement qu'à un seul procédé d'enregistrement. Actuellement, trois seulement parmi les différents pyromètres ont pu être rendus enregistreurs :

Le pyromètre à gaz à volume constant,

Le pyromètre thermo-électrique,

Le pyromètre à résistance électrique.

Mais pratiquement, jusqu'ici, le pyromètre thermo-électrique a seul fonctionné d'une façon continue comme enregistreur.

Pyromètre enregistreur à gaz. — La transformation du pyromètre à gaz en pyromètre enregistreur est extrêmement simple et a été faite depuis longtemps. Il suffit de réunir d'une façon invariable le tube du réservoir en porcelaine à un manomètre enregistreur pour réaliser un pyromètre enregistreur théoriquement parfait. Mais pratiquement, ces appareils présentent des inconvénients multiples qui ont empêché leur emploi de se répandre.

Au-dessus de 1 000°, la perméabilité de la porcelaine à la vapeur d'eau suffit pour les mettre très rapidement hors de service. Des expériences faites à la Compagnie Parisienne du gaz ont montré que dans les fours chauffés à 1 100°, la pénétration de la vapeur d'eau est assez rapide pour qu'au bout de quelques jours on puisse recueillir de l'eau liquide dans les parties froides de l'appareil.

L'étanchéité absolue de l'appareil, qui est tout à fait indispensable, puisque son fonctionnement suppose l'invariabilité de la masse gazeuse, est très difficile à obtenir. Fréquemment, la couverte de la porcelaine présente des piqûres. Les nombreuses soudures que comportent l'appareil enregistreur, et surtout les parties métalliques de l'appareil, peuvent donner lieu à des fuites de gaz très faibles et difficiles à reconnaître.

Le raccord des parties métalliques avec le tube de porcelaine se fait généralement avec de la cire, toujours avec des matières d'origine organique qui, au voisinage des appareils industriels généralement volumineux

et à parois épaisses, ne peuvent être protégées contre le rayonnement que par une enveloppe à circulation d'eau. C'est là une sujétion grave.

Dans les appareils de laboratoire de petites dimensions, la protection du joint est plus facile, mais alors les grandes dimensions du réservoir sont, comme on l'a déjà indiqué, un grave inconvénient. On ne peut, dans un petit four, trouver un grand volume dont la température soit uniforme.

Mais l'inconvénient le plus immédiat du pyromètre enregistreur à gaz, qui a dû être la cause principale de son abandon, est la difficulté de sa graduation. Déjà avec le manomètre à mercure, la présence de l'espace *nuisible est une source de complications*. On peut cependant la mesurer et en tenir compte. Avec le manomètre enregistreur, l'espace nuisible est beaucoup plus grand, et de plus, variable avec la déformation du tube élastique. La graduation ne pourrait donc être faite que d'une façon empirique, en employant des bains à point de fusion ou d'ébullition fixe, ce qui est presque toujours irréalisable avec un appareil en porcelaine très fragile.

Pyromètre enregistreur à résistance électrique. — Après le pyromètre à gaz, le plus ancien en date, nous donnerons immédiatement le pyromètre à résistance électrique qui est le plus récent. Il n'a pas encore été employé et il n'y a, pour ce motif, que peu de choses à en dire.

Pour rendre son pyromètre enregistreur (fig. 39), M. Callendar emploie l'artifice suivant très simple. Deux des branches du pont de Wheastone servant à mesurer la résistance de la spirale chauffée sont constituées par un fil unique sur lequel glisse un curseur auquel

aboutit un des fils du galvanomètre. A chaque position du curseur correspond, quand le galvanomètre est au zéro, une résistance, et par suite une température déterminée de la spirale.

La position du curseur peut être enregistrée facilement en y fixant une plume écrivant sur une feuille de papier qui se déplace perpendiculairement à la longueur du fil. Il suffira, pour que la courbe ainsi obtenue corresponde à celle des températures, que la position des curseurs soit à chaque instant réglée de façon à maintenir le galvanomètre au zéro.

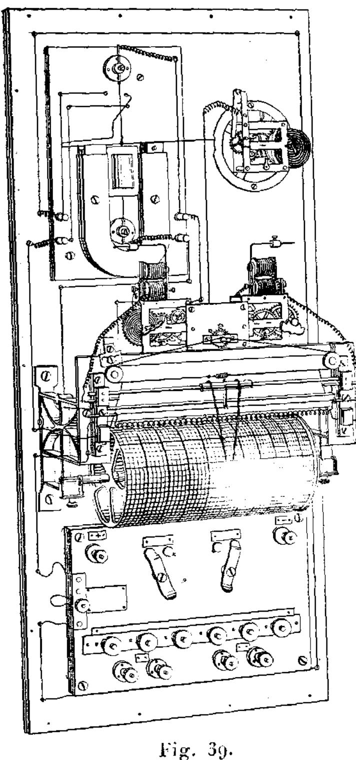


Fig. 39.

Ce résultat est obtenu au moyen d'un mouvement d'horlogerie commandé par un relais que le galvanomètre actionne dans un sens ou dans un autre suivant le sens de la déviation qu'il tend à éprouver à partir du zéro. C'est un galvanomètre à cadre mobile dont l'aiguille porte une fourche qui vient buter sur un contact donnant alors passage à un courant.

La figure 40 donne un exemple d'une courbe enregistrée avec cet appareil.

Cet appareil enregistreur compliqué est nécessairement très coûteux, mais il est actuellement le seul qui

permette l'enregistrement des températures élevées par des procédés purement mécaniques, sans l'intervention

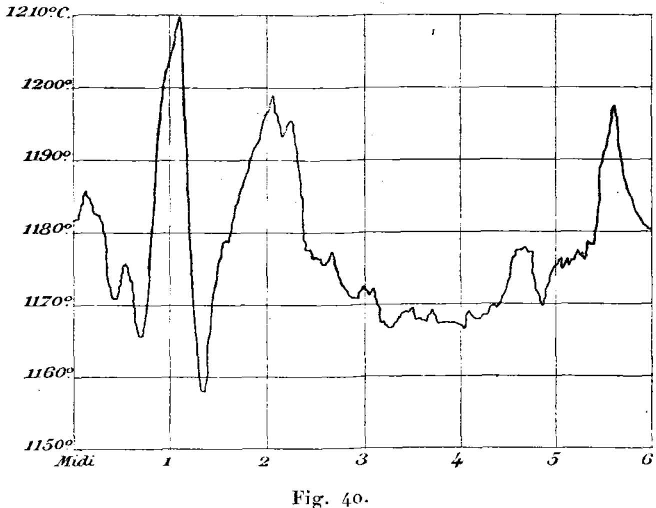


Fig. 40.

de la photographie ; il est possible que son emploi se répande dans certaines grandes usines. Pour les travaux

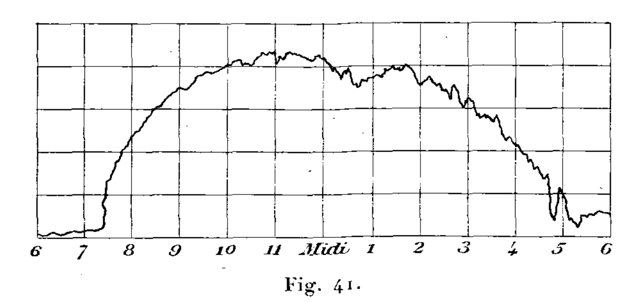


Fig. 41.

de laboratoire il semble moins convenable ; l'enregistrement enlève à la méthode des résistances électriques la grande précision qu'elle comporte et qui en fait le principal mérite ; elle lui laisse ses inconvénients : obligation d'employer pour la protection de la spirale un tube de porcelaine fragile et relativement volumineux.

Cet enregistreur présente un détail intéressant qui en assure le bon fonctionnement et pourrait être utilisé dans d'autres cas semblables. La fourchette de l'aiguille du galvanomètre ne vient pas buter contre un conducteur fixe sur lequel elle se collerait en raison de l'échauffement résultant du passage du courant et surtout de l'extra-courant de rupture. Ce conducteur est constitué par la circonférence métallique d'une roue qui est animée d'un mouvement de rotation lent, mais continu, ce qui rend toute adhérence impossible. Cet artifice permet de faire actionner des relais au moyen d'un galvanomètre même très sensible, ce qui serait impossible autrement.

M. Callendar a appliqué la même méthode d'enregistrement au bolomètre de Langley. La courbe ci-contre (fig. 41) donne l'enregistrement de la radiation solaire pendant une journée.

Théoriquement au moins la même méthode d'enregistrement peut s'appliquer à la mesure des températures au moyen des couples thermo-électriques en employant la méthode par opposition. Mais dans ce cas l'intensité des courants disponibles pour actionner le relais est beaucoup plus faible que dans les applications précédentes, et il n'est pas certain que l'on puisse obtenir une sensibilité suffisante.

Pyromètre enregistreur thermo-électrique. — Les seuls pyromètres enregistreurs employés couramment aujourd'hui sont les pyromètres thermo-électriques à enregistrement photographique. De nombreuses tentatives ont été faites pour obtenir un enregistrement avec une plume comme cela se fait pour les voltmètres et ampèremètres industriels enregistreurs, mais jusqu'ici on n'a pas encore réussi. Les intensités de courant

dont on dispose sont trop faibles ; en se contentant d'une précision de 10°, il faut un appareil sensible au $\frac{1}{10\,000}$ de volt ; la résistance des cadres du galvanomètre devant, pour les raisons exposées plus haut, être considérable, 100 ohms au moins, le courant correspondant ne sera que de un millionième d'ampère. On trouve bien dans le commerce de prétendus pyromètres enregistreurs semblables, mais ils sont construits avec des cadres de galvanomètre de quelques ohms seulement et ne peuvent pas donner de mesures de températures exactes à 100° près.

Dans l'enregistrement des températures, on peut chercher deux résultats tout à fait différents auxquels conviennent des procédés d'enregistrement également différents. On peut se proposer de déterminer la température à une époque déterminée, c'est-à-dire de tracer la courbe des températures en fonction du temps. Ce sera presque toujours le but poursuivi dans les usines. Il suffit, dans ce cas, de faire tomber le faisceau lumineux réfléchi par le miroir du galvanomètre sur une plaque sensible animée d'un mouvement de translation vertical. Les deux coordonnées de la courbe ainsi enregistrée donnent, l'une la température, l'autre le temps. On peut, au contraire, se proposer de connaître la vitesse de variation de la température à un moment donné, en même temps que la valeur correspondante de la température. C'est le cas dans la plupart des recherches de laboratoire dans lesquelles on cherche la température à laquelle se produit un phénomène déterminé : fusion, transformation allotropique, etc. ; et pour reconnaître la production de ce phénomène, on utilise le plus souvent l'absorption ou le dégagement corrélatif de chaleur latente qui se traduit par une variation dans la loi de l'échauffement ou du refroidissement.

C'est ce dernier mode d'enregistrement qui a été le premier réalisé par M. H. Lechatelier à l'occasion de ses études sur les argiles. Un faisceau lumineux réfléchi par le miroir du galvanomètre est envoyé périodiquement à des intervalles réguliers, de une seconde par exemple, sur une plaque sensible fixe. La distance de deux images successives donne la variation de température pendant l'unité de temps, c'est-à-dire la vitesse d'échauffement ou de refroidissement ; la distance de la même image à l'image correspondant au début du chauffage donnera la mesure de la température.

Dans toutes les expériences d'enregistrement photographique, il faut remplacer les *miroirs* habituels des galvanomètres qui donnent des images tout à fait insuffisantes comme netteté et comme intensité par des miroirs spéciaux formés par une lentille plan convexe, argentée sur sa face plane. Ces miroirs sont un peu plus lourds que les miroirs à faces parallèles, mais ils ont deux avantages importants : l'absence d'images parasites réfléchies par la surface antérieure du miroir et une plus grande rigidité qui évite les flexions accidentelles du miroir par suite de la fixation sur son support. On obtient facilement de bons miroirs semblables de 20 millimètres de diamètre et plus difficilement de 30 millimètres de diamètre. Ces derniers donnent neuf fois plus de lumière que les miroirs habituellement employés. Il est facile de faire le choix de la lentille pour obtenir un miroir de distance focale déterminée. Une lentille plan convexe dont le foyer principal par transmission est de 1 mètre donnera, après argenture de la face plane, un système optique équivalant à un miroir à faces parallèles dont le rayon de courbure serait également de 1 mètre.

Enregistrement discontinu. — Dans ce mode d'enre-

gistrement la *source lumineuse* doit présenter des variations périodiques ; une des plus simples à employer est une étincelle d'induction jaillissant entre deux pointes métalliques. L'interruption du courant est produite par une pendule à des intervalles de temps déterminé

Pour avoir une étincelle assez lumineuse il faut employer une bobine d'induction actionnée de façon à donner librement des étincelles de 50 millimètres et la renforcer au moyen d'une bouteille de Leyde qui réduise la longueur de ces étincelles à 5 millimètres ; il suffit pour cela d'une jarre de 1 à 2 litres. Le choix du métal constituant les pointes est également important ; le zinc, l'aluminium et surtout le magnésium donnent des étincelles très photogéniques. Ces métaux ont l'inconvénient de s'oxyder assez rapidement à l'air, ce qui oblige à retailler de temps en temps les pointes avec quelques coups de lime. Les baguettes de métal peuvent avoir 5 millimètres de diamètre, et la distance des pointes est de 2 millimètres. On pourrait sans doute avec le mercure, qui donne des étincelles aussi photogéniques que le magnésium, constituer un appareil clos où le métal se conserverait inaltéré.

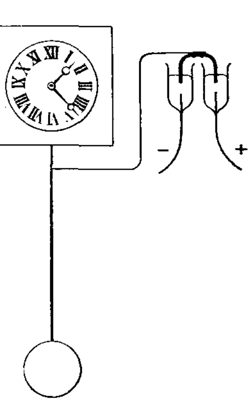


Fig. 42.

Pour provoquer l'interruption, on fixe au balancier (fig. 42) une fourchette verticale en platine qui vient plonger dans deux masses de mercure couvertes d'alcool. Il est utile, pour réduire au minimum la résistance que l'immersion de la fourchette oppose au mouvement de la pendule, de placer cette fourchette dans le même plan horizontal que l'axe de rotation du pendule. On évite

ainsi les mouvements de translation dans le mercure qui sont de beaucoup les plus nuisibles.

Le seul point délicat dans cet éclairage intermittent est d'obtenir, avec l'étincelle beaucoup trop large et trop irrégulière pour être photographiée directement, l'éclairage d'une fente très fine. On ne peut se contenter de placer l'étincelle derrière la fente et à une petite distance parce que le plus petit déplacement de l'étincelle ferait tomber le pinceau lumineux en dehors du miroir

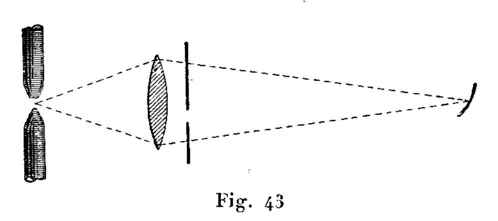


Fig. 43

du galvanomètre. On tourne facilement cette difficulté au moyen d'un artifice bien connu. Une lentille est interposée entre les pointes et le miroir (fig. 43) ; on règle la position des pointes de telle sorte que l'image du miroir vienne se projeter entre ces deux pointes. Avec une distance des pointes de 2 millimètres, une lentille de 100 millimètres de distance focale principale et un miroir de 25 millimètres de diamètre, l'image de ce dernier touchera les deux pointes ; l'étincelle traversera nécessairement alors l'image du miroir et les radiations transmises par la lentille tomberont certainement sur le miroir. On est donc assuré en plaçant devant la lentille une fente métallique fine que toutes les radiations transmises arriveront au miroir et seront renvoyées sur la plaque photographique, et cela quelle que soit la position de la fente devant la lentille.

Pour économiser le temps il est avantageux de faire sur une même plaque plusieurs expériences ; on y arrive

très simplement en disposant la plaque de façon à ce qu'elle puisse être déplacée verticalement entre deux expériences, ou en disposant la fente de façon à ce qu'elle puisse être semblablement déplacée devant la lentille.

Le tableau ci-dessous (fig. 44) est la reproduction de

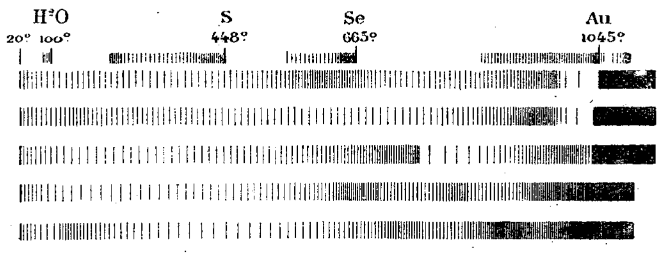


Fig. 44.

clichés relatifs à l'action de la chaleur sur les argiles. La première ligne donne la graduation du couple, elle a été dessinée d'après plusieurs photographies différentes qui ont été groupées pour économiser la place. Les lignes suivantes, 1, 2, 3, 4, 5 sont des reproductions de clichés faits en phototypographie sans aucune intervention de la main du dessinateur. La ligne 1 par exemple, représente l'échauffement d'une argile ordinaire. Un léger resserrement des traits entre 150 et 350° indique un premier phénomène avec absorption de chaleur, c'est la vaporisation de l'eau hygrométrique. Un second ralentissement beaucoup plus important entre 550° et 650° indique la déshydratation proprement dite de l'argile, le départ des deux molécules d'eau combinées. Enfin, l'espacement considérable des traits à 1000° indique un dégagement brusque de chaleur corrélatif du changement d'état isomérique après lequel l'alumine est devenue insoluble dans les acides. Les autres lignes

se rapportent à l'échauffement d'autres variétés d'argile, la ligne 3 au kaolin, la ligne 5 à la stéargilite.

Enregistrement continu. — L'enregistrement continu des températures est d'un usage beaucoup plus général, même dans les laboratoires scientifiques, en raison sans doute de la simplicité plus grande de son installation. Il a été étudié surtout par M. Roberts Austen, directeur de la Monnaie royale de Londres. Une fente verticale éclairée par une source lumineuse convenable projette, par l'intermédiaire du miroir du galvanomètre, son image sur une plaque métallique percée d'une fine fente horizontale, et derrière cette fente se déplace une surface sensible, plaque ou papier, qui reçoit le pinceau lumineux, déterminé par l'intersection de la fente horizontale avec l'image de la fente verticale. Si tout était en repos l'impression produite par ce pinceau lumineux se réduirait à un point. Si la plaque se déplace seule, on aura une ligne droite verticale ; si le galvanomètre se déplace seul, une ligne horizontale. Enfin le déplacement simultané de la plaque et du miroir du galvanomètre donne une courbe dont les abscisses horizontales représentent les températures, et les ordonnées verticales les temps.

L'éclairement de la fente, le mouvement de la surface sensible peuvent être réalisés de bien des façons différentes.

Eclairement de la fente. — Il y a deux cas bien distincts à considérer, celui des expériences de laboratoire par échauffement ou refroidissement rapide qui ne durent que quelques minutes, et celui de l'enregistrement continu des températures dans un foyer industriel qui pourra durer des heures et des jours, c'est-à-dire

des temps 100 fois et 1000 fois plus considérables. La vitesse de déplacement de la surface sensible, et par suite la durée d'exposition à l'action lumineuse, pourra varier dans le même rapport. La source lumineuse nécessaire sera donc tout à fait différente suivant les cas. Pour les déplacements très lents, on pourra se contenter d'une petite lampe veilleuse à pétrole ou à essence ayant une flamme de 5 à 10 millimètres de hauteur, ou même d'une simple flamme de gaz. Pour des déplacements plus rapides, on emploiera une lampe à pétrole ordinaire à verre, un bec Auer, ou une lampe à incandescence ; enfin pour les déplacements très rapides de la plaque sensible, 10 millimètres à 100 millimètres par minute, on peut avantageusement recourir à la lumière oxhydrique ou à l'arc électrique. Comme lumière oxhydrique, la plus commode est la lampe du Dr Roux à sphères de magnésie ; elle consomme peu de gaz et est enfermée dans une boîte métallique qui empêche toutes les diffusions gênantes de lumières.

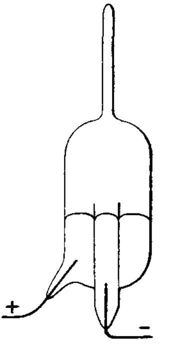


Fig. 45.

L'arc électrique donne beaucoup plus de lumière que l'on n'en a besoin et l'usure rapide du charbon en déplaçant les positions du point lumineux rend difficile la permanence de l'éclairement convenable de la fente. Pour des expériences très courtes, on peut très commodément employer la lampe à mercure dans le vide (fig. 45) où l'arc jaillit entre deux surfaces de mercure. Pour l'entretenir il faut 30 volts et 3 ampères. Son seul inconvénient est de s'éteindre après quelques minutes de fonctionnement par suite de l'évaporation du mercure dans le tube central. Il suffit, il est vrai, d'une simple secousse

pour la remettre en marche en faisant repasser une petite quantité de mercure de l'espace annulaire antérieur dans le tube central.

Quelle que soit la source lumineuse employée, on peut éclairer la fente au moyen d'une lentille disposée comme il a été indiqué à propos de l'enregistrement discontinu, c'est-à-dire projetant sur le miroir du galvanomètre l'image de la source lumineuse. Quand celle-ci est assez large, on pourrait se contenter de placer la fente devant la source lumineuse en la rapprochant suffisamment pour être certain que quelques-uns des rayons lumineux la traversant tombent bien sur le miroir. Mais on s'expose ainsi à beaucoup chauffer la fente, ce qui peut l'altérer; on est conduit en outre à employer des sources lumineuses plus volumineuses que cela ne serait nécessaire autrement. Dans le cas de l'emploi d'une lentille, l'intensité lumineuse utile est aussi grande qu'en plaçant la fente immédiatement contre la source lumineuse toutes les fois que l'image de celle-ci est plus grande que le miroir du galvanomètre; or avec les dimensions habituelles des sources employées, cette condition se trouve toujours remplie sans aucune précaution spéciale.

Au lieu d'une fente éclairée par une source distincte, on peut employer un fil de platine ou mieux, comme le fait M. Charpy, un filament de charbon de lampe à incandescence chauffé par le courant électrique.

Pour que le trait de la courbe enregistrée soit très fin, il est nécessaire que les deux fentes, la fente lumineuse et la fente horizontale, soient également très fines. Des ouvriers habiles peuvent tailler dans le métal des fentes semblables. Mais on peut les constituer beaucoup plus simplement en prenant une plaque photographique au gélatino-bromure que l'on expose à la lumière, déve-

loppe jusqu'à noircissement complet, puis lave et sèche. En coupant la gélatine avec la pointe d'un canif guidé par une règle, on obtient des fentes transparentes d'une finesse et d'une netteté parfaite.

Surface sensible. — On emploie comme surface sensible des plaques ou des papiers au gélatino-bromure. Le professeur Roberts Austen emploie exclusivement les plaques qui permettent plus facilement le tirage d'un grand nombre d'épreuves positives. M. Charpy, dans ses recherches sur la trempe de l'acier, s'est servi de papier sensible, ce qui permet d'avoir des installations beaucoup plus simples.

Papier. — Pour l'enregistrement industriel, le papier

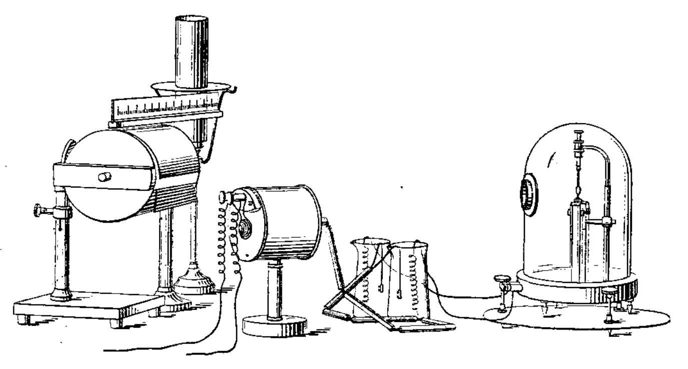


Fig. 46.

permettrait d'employer de grands rouleaux pouvant durer plusieurs jours, comme dans les appareils magnétiques enregistreurs de M. Mascart. Mais en général on a besoin d'obtenir rapidement les résultats de l'enregistrement ; c'est toujours le cas dans les expériences de laboratoires, et presque toujours aussi dans les études industrielles. Il est donc préférable de se contenter de

bandes de papier assez courtes enroulées sur un cylindre. Il existe un modèle semblable très répandu et dont l'emploi est très pratique : les cylindres enregistreurs de la maison Richard avec mouvement d'horlogerie intérieur. On peut les commander au constructeur avec la vitesse de rotation que l'on désire ; malheureusement cette vitesse ne peut être changée au gré de l'opérateur, ce qui serait souvent utile pour les expériences de laboratoire.

La figure 46 représente l'installation du pyromètre enregistreur employé par M. Charpy dans ses expériences sur la trempe de l'acier. A droite le galvanomètre, à gauche le cylindre enregistreur Richard, au milieu le four électrique servant au chauffage des échantillons d'acier.

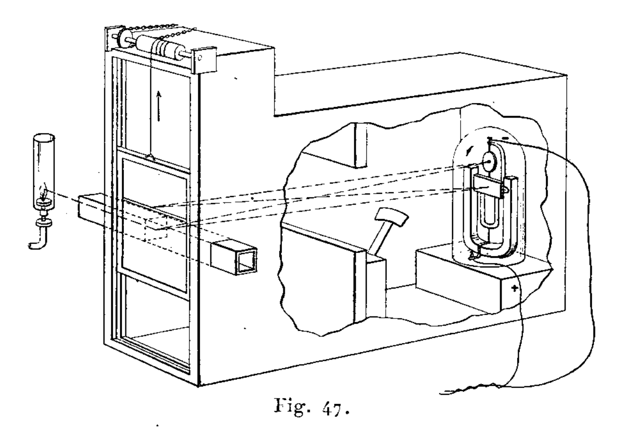


Fig. 47.

Plaques. — La plaque peut être fixée dans un châssis mobile entraîné par un mouvement d'horlogerie, c'est la première disposition (fig. 47) employée par le professeur Roberts Austen. Mais cette installation un peu coûteuse et compliquée a le même inconvénient que les cylindres enregistreurs de ne pouvoir donner qu'une seule vitesse de déplacement à la surface sensible.

M. Roberts Austen emploie maintenant pour déplacer la plaque un système à flotteur dans lequel la vitesse d'élévation du niveau de l'eau est réglée à volonté par l'emploi d'un vase de Mariotte et d'un simple robinet. La plaque est maintenue dans un plan vertical invariable au moyen de deux guides latéraux dont le frottement est négligeable en raison de la mobilité du flotteur. Le croquis ci-contre (fig. 48) donne la disposition d'un appareil semblable qui a été construit par M. Pellin pour le laboratoire du Collège de France. Il porte une plaque 13 × 18 qui est fixée sur le flotteur au moyen de deux ressorts latéraux non indiqués sur le croquis. Les deux guides du flotteur, noyés

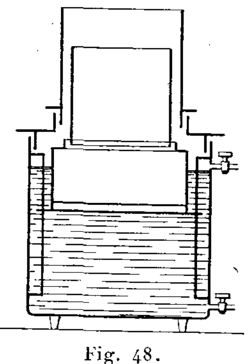


Fig. 48.

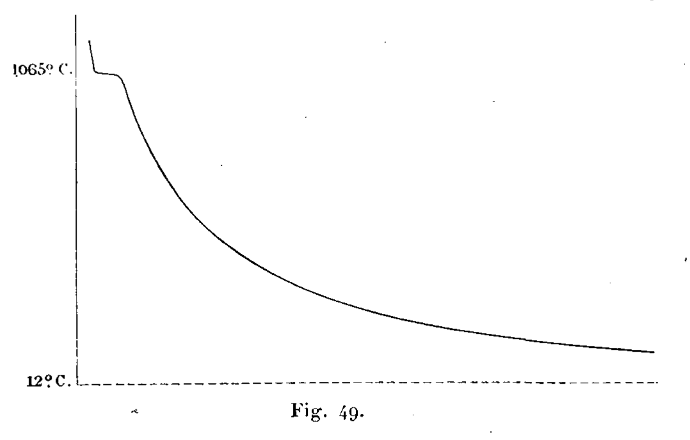


Fig. 49.

sous l'eau, ne sont pas non plus indiqués : le jeu dans le guidage est seulement de 2 dixièmes de millimètre. L'incertitude que ce jeu peut occasionner dans la position de la plaque est tout à fait négligeable.

La courbe ci-dessus (fig. 49) est la reproduction d'une

expérience faite avec un dispositif semblable par M. Roberts Austen sur la solidification de l'or.

Pendant toute la durée de la solidification, la température est restée stationnaire, puis l'abaissement de la température s'est produit avec une vitesse régulièrement décroissante au fur et à mesure que la température du métal se rapprochait de la température ambiante.

Il est indispensable de tracer sur chaque surface sensible où l'on a enregistré une courbe la ligne de température ambiante, ou tout au moins une ligne de repère parallèle. Cela est très facile dans le cas de la plaque guidée ou du papier enroulé sur un cylindre. Il suffit, après avoir ramené le couple à la température ambiante, de déplacer en sens inverse la surface sensible, la seconde courbe tracée pendant ce mouvement inverse est précisément la ligne du zéro de la graduation des températures. Mais c'est là une sujétion que l'on peut éviter en inscrivant en même temps que la courbe une ligne de repère au moyen d'un miroir fixe attaché au galvanomètre sur le trajet du faisceau lumineux qui éclaire le miroir mobile. M. Roberts Austen utilise en même temps le faisceau lumineux réfléchi par le miroir fixe pour inscrire le temps d'une façon précise. Un écran mobile commandé par une pendule à secondes interrompt à des intervalles de temps égaux ce second faisceau lumineux. La ligne de repère, au lieu d'être continue, est formée d'une série de traits discontinus dont les points correspondants sont espacés d'une seconde comme on le voit sur la figure 49.

Les courbes une fois obtenues doivent être examinées de très près pour reconnaître les points où l'inclinaison présente des anomalies passagères, caractéristiques des transformations du corps étudié. Le plus souvent, ces irrégularités se réduisent à très peu de chose,

et il y aurait intérêt, pour les reconnaître avec certitude, d'obtenir des courbes tracées à beaucoup plus grande échelle. Pratiquement, cette amplification n'est pas possible ; on peut bien augmenter la sensibilité du galvanomètre, et par suite ses déviations, mais alors l'image lumineuse pour la plupart des températures tombera en dehors de la plaque sensible. Le professeur Roberts Austen a tourné cette difficulté d'une façon très ingénieuse. Il n'enregistre plus la température du corps, mais la différence entre cette température et celle d'un corps voisin ne présentant pas de transformation, le platine, par exemple. Cet écart de température, toujours

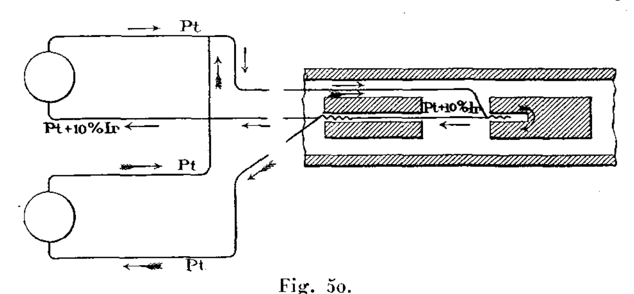


Fig. 50.

faible, peut être enregistré avec un galvanomètre très sensible. Si à un moment donné, le corps, autre que le platine, éprouve un changement d'état accompagné de phénomènes calorifiques même très faibles, la différence des deux températures pourra, en raison de sa faible valeur, éprouver des variations relativement très grandes. Si l'on se propose, non seulement de reconnaître l'existence d'un phénomène, mais encore de mesurer la température à laquelle il se produit, il faudra employer simultanément un couple relié à un autre galvanomètre. On peut, avec trois fils, deux de platine et un de platine rhodié, constituer un couple complexe donnant à la fois les températures réelles et les diffé-

rences de température de deux corps voisins. Le cro-

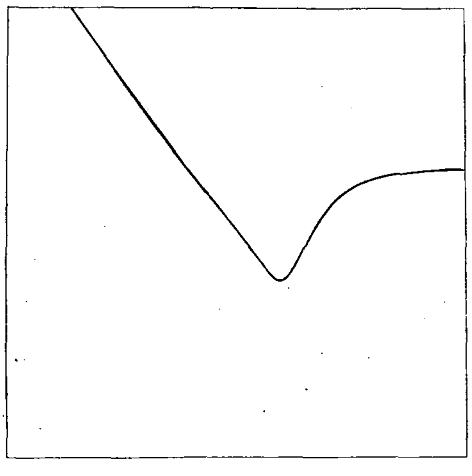


Fig. 51.

quis schématique ci-dessus (fig. 50) donne une idée

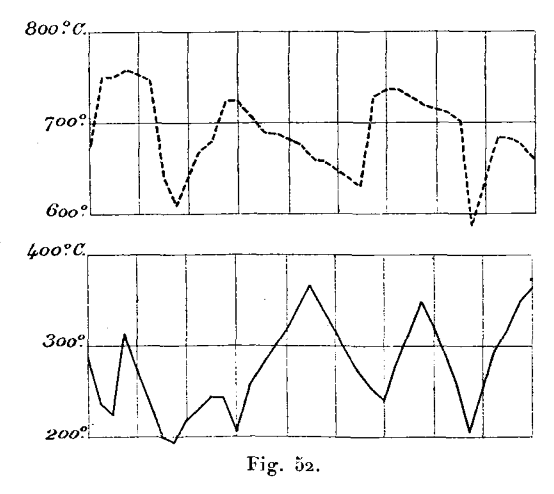


Fig. 52.

de cette disposition qui a rendu de grands services à M. Roberts Austen dans l'étude des alliages et, en particulier, dans l'étude des transformations des fers et aciers.

On reproduit ci-contre une courbe de solidification de l'étain (fig. 51) obtenue par cette méthode. Le double crochet indique l'existence d'une surfusion très nette; l'étain, avant de se solidifier, descend de 2° au-dessous de son point de fusion auquel il revient brusquement aussitôt la solidification commencée.

Les pyromètres enregistreurs ont plutôt été employés jusqu'ici dans les laboratoires scientifiques. Il en existe cependant quelques-uns dans des usines métallurgiques, notamment aux hauts fourneaux de Clarence Works appartenant à sir Lothian Bell et aux hauts fourneaux de Dowlais. Les courbes de la figure 52 donnent un exemple de courbes relevées à Clarence Works ; la courbe inférieure donne la température des gaz au gueulard, et la courbe supérieure, celle du vent chaud.

CONCLUSION

En terminant cet exposé il ne sera pas inutile d'appeler l'attention des expérimentateurs sur les points dont l'étude paraît la plus urgente pour faire progresser notre connaissance des températures élevées.

Nous mentionnerons d'abord la détermination précise des points fixes servant à la graduation des pyromètres ; il n'existe actuellement au-dessus du point d'ébullition du soufre aucune température connue d'une façon certaine à 1° près. Pour l'ébullition du zinc, la fusion de l'argent et celle de l'or qui sont actuellement les mieux connues, l'incertitude peut être de 10°. Il faudrait également tâcher de trouver pour servir de points fixes des corps d'un emploi plus commode que les métaux, des sels, par exemple, qui n'attaquent le platine ni à l'état fondu, ni à l'état de vapeur ; ces corps devraient être obtenus facilement et économiquement à l'état de pureté ; ils devraient posséder des points de fusion et d'ébullition bien déterminés, ce qui n'est pas toujours le cas quand le sel cristallisé présente plusieurs variétés dimorphes.

Un second point très important en vue des recherches de haute précision serait de déterminer la forme générale de la fonction qui relie la résistance électrique du platine à la température. On ne peut pas se proposer de déterminer complètement cette fonction avec la valeur de ses paramètres parce qu'il n'y a pas deux échantil-

lons de platine possédant la même résistance ; il faut dans chaque cas faire la graduation au moyen de points fixes de fusion ou d'ébullition. Le nombre de points semblables à repérer dépend du nombre de paramètres contenus dans la formule. Dans cet ordre d'idées, M. Silas Holman a grandement facilité l'emploi des couples thermo-électriques en montrant que l'on pouvait entre 0 et 1800° se contenter d'une formule logarithmique ne contenant que deux paramètres.

Pour la mesure des températures extrêmement élevées qui ne peuvent être atteintes que par les méthodes employant la radiation, et en se livrant à des extrapolations souvent considérables, il serait très utile de déterminer avec plus de précision qu'on ne l'a fait jusqu'ici les lois de la radiation d'un corps rigoureusement noir (enceinte fermée), soit pour une radiation monochromatique, radiation transmise par les verres rouges, soit pour la totalité des radiations calorifiques. Mais une semblable étude ne peut avoir d'intérêt qu'à la condition de présenter une précision très grande, difficile à atteindre actuellement en raison de l'incertitude qui règne encore sur les températures directement mesurables. Pour une précision moyenne, on peut se contenter des formules de Stefan et de M. Le Chatelier, certainement très voisines de la réalité, puisqu'elles s'accordent encore sensiblement jusqu'à la température du soleil voisine de 8 000°. Il y aurait seulement à vérifier et à préciser davantage les valeurs des paramètres qui entrent dans ces deux formules.

Qu'il nous soit permis en terminant d'insister sur un fait qui a son importance. La mesure des températures élevées présente certainement un grand intérêt au point

de vue des progrès de la science pure ; ce problème n'est cependant arrivé à des solutions satisfaisantes que sous l'influence de préoccupations industrielles. Wedgwood, fabricant de faïence, cherchait à améliorer sa fabrication ; de même Seger, à la manufacture de Berlin, s'occupait exclusivement des produits céramiques, Siemens cherchait à régulariser la fabrication de l'acier fondu sur sole, les ingénieurs de la Compagnie Parisienne avaient en vue un moyen de contrôle de la distillation de la houille, M. H. Le Chatelier a étudié le pyromètre thermo-électrique au cours de recherches sur la cuisson de la chaux et sur la fabrication des ciments ; il a étudié le pyromètre optique à la demande d'un fabricant d'acier de Sheffield, M. Hadfield, qui désirait pour son industrie un pyromètre réunissant la précision à la simplicité d'emploi. M. Roberts Austen, directeur de la monnaie de Londres, consacre tous ses efforts depuis bien des années à l'étude des alliages industriels pour laquelle il a su tirer un parti si utile du pyromètre enregistreur.

Cette répercussion des préoccupations pratiques sur les progrès de la science n'a rien qui doive surprendre. Les savants qui ont fondé la chimie ne connaissaient pas la distinction entre la science théorique et la science pratique. Lavoisier, Chevreul, Gay-Lussac, Dumas, Thénaud, H. Sainte-Claire-Deville allaient indifféremment du laboratoire à l'usine. C'est l'orientation actuelle de notre enseignement qui a creusé un fossé tous les jours plus profond entre la théorie et la pratique.

Dans les laboratoires scientifiques tous les efforts convergent vers les sentiers depuis longtemps frayés. On y est maître de choisir ses sujets d'études au gré de ses caprices, on peut se laisser guider par des préoccupations artificielles ne se rattachant que bien indirectement à l'étude de la nature. Enfin on pourra longtemps

accorder sa confiance à des résultats erronés sans que rien vous oblige à reconnaître l'erreur commise. Dans les usines, il en est tout autrement; on ne peut pas s'immobiliser sur les problèmes déjà résolus, on est malgré soi obligé à marcher de l'avant. Les sujets d'étude s'imposent et doivent nécessairement être abordés dans l'ordre de leur importance réelle. Les conclusions erronées sont mises en évidence par leurs contradictions de tous les instants avec des faits que l'on ne peut se refuser à voir. Ces conditions expliquent comment les laboratoires d'usines avec leur personnel insuffisant et absorbé par d'autres préoccupations, avec leur matériel rudimentaire, arrivent cependant à contribuer largement aux progrès de la science pure. Tous les progrès si importants de la chimie du fer se font aujourd'hui dans les usines et dans les laboratoires qui sont en rapport avec elles.

Il n'y a pas qu'en chimie d'ailleurs que les préoccupations pratiques aient manifesté cette puissance créatrice. C'est en étudiant le forage des canons que Rumford a rencontré la notion de conservation de l'énergie, c'est en réfléchissant au fonctionnement des machines à feu que Sadi Carnot a jeté les bases de toute la thermo-dynamique, c'est en cherchant à perfectionner les lentilles de phares que Fresnel à porté ses investigations sur la théorie de la lumière.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

ÉCHELLE NORMALE DES TEMPÉRATURES.

Carnot. — Réflexions sur la puissance motrice du feu.

Lippmann. — Traité de thermodynamique, p. 51.

Thompson et Joule. — Philosophical Transaction of the Royal Society, t. CLII, 1862, p. 579.

Lehrfeldt. — Philosophical Magazine, t. XLV, p. 363 (1898).

Callendar. — Phil. trans. of R. S., t. CLXXVIII, (1888), p. 161-220.

Regnault. — Relation sur des expériences... (1847), t. I, p. 168.

Chappuis. — Études sur le thermomètre à gaz (Trav. du bureau international des poids et mesures (1888), t. VI).

PYROMÈTRES A GAZ.

Pouillet. — Traité de physique, 9e édition (1858), t. I, p. 233. — C. R., t. III (1836), p. 782.

Ed. Becquerel. — C. R., t. LVII, (1863), p. 855, 902 et 955.

Sainte-Claire Deville et Troost. — C. R., t. XC (1889), p. 727 et 773.

Violle. — Chaleur spécifique du platine. C. R., t. LXXXV (1877), p. 543. — Chaleur spécifique du palladium. C. R., t. LXXXVII (1873), p. 98. — Point d'ébullition du zinc. C. R., t. XCIV (1882), p. 721.

C. Barus. — Mesure des températures élevées. Bulletin du service géologique des États-Unis (1889), n° 54.

Holborn et Wien. — Bulletin de la Société d'encouragement, 5e série, t. I (1896), p. 1012.

Crafts et Meier. — Densité de la vapeur d'iode. C. R., t. XC (1880), p. 690.

Randall. — Perméabilité du platine. Bull. Soc. Chim., t. XXI (1898), p. 682-692.

Mallard et Le Chatelier. — Ann. des Mines, t. IV (1884), p. 276.

Daniel Berthelot. — Sur une nouvelle méthode pour la mesure des températures. C. R., t. CXX (1895), p. 831.

PYROMÈTRE CALORIMÉTRIQUE.

Violle. — Points de fusion et d'ébullition C. R., t. LXXXIX (1879), p. 702.

Le Chatelier. — Seizième congrès de la Société technique de l'industrie du gaz (juin 1889).

Euchêne. — Des relations thermiques dans la distillation de la houille (autographie).

Berthelot. — Calorimètre. Ann. Chim. et Phys., 4e série, t. XX, p. 109 ; 5e série, t. V, p. 5 ; 5e série, t. X, p. 433 et 447 ; 5e série, t. XII, p. 550.

PYROMÈTRE A RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE.

W. Siemens. — Proc. royal Soc., t. XIX (1871), p. 351. — Bakerian lecture (1871). — Transaction of Society of Telegraph engineers (1879). — British association (1874), p. 242.

Callendar. — Phil. Trans. of R. S., t. CLXXVIII (1888), p. 160-230. — Phil. Trans., 1892, p. 119. — Les pyromètres en platine. Iron and Steel Institute, mai 1892. — Phil. Magazine, t. XXXII, p. 104 (1891), t. XXXIII, p. 220 (1892).

Heycock et Neville. — Détermination of high temperatures. J. of chem. Society, t. LXVIII (1895), p. 160 et 1024.

Holborn et Wien. — Annalen der Phys. und Chem., t. XLVII (1892), p. 107 ; t. LVI (1895), p. 360. — Bulletin de la Société d'encouragement, 5e série, t. I (1896), p. 1012.

PYROMÈTRE THERMO-ÉLECTRIQUE.

Becquerel. — Ann. Chim. et Phys., 2e série, t. XXXI, p. 371 (1826).

Pouillet. — Traité de physique, 4e éd., t. II, p. 684. — Comptes rendus, t. III, p. 786.

Ed. Becquerel. — Annales du Conservatoire, t. IV (1864), p. 597. — Comptes rendus, t. LV (1862), p. 826. — Annales de chimie et physique, 3e série, t. LXVIII (1863), p. 49.

Regnault. — Relation des expériences sur les machines à feu, t. I, p. 240. — Comptes rendus, t. XXI (1847), p. 240.

Le Chatelier. — Pyromètre thermo-électrique. C. R., t. CII (1886), p. 819. — Journal de physique, 2e série, t. VI, janvier 1887. — Génie civil, 5 mars 1887. — 16e congrès de la Sociététechnique de l'industrie du gaz, juin 1889. — Bulletin de la Société d'encouragement (1892).

C. Barus. — Washington, 1889. — Bull. du serv. géol. des États-Unis, n° 54.

Holborn and Wien. — Annalen der phys. und chem., t. XLVII (1892), p. 107 ; t. LVI (1895), p. 360. — Zeit. des Vereines deutscher ingenieurs, t. XLI (1896), p. 226-227. — Stahl und Eisen, t. XVI, p. 840.

Roberts Austen. — Les progrès récents de la pyrométrie. — Transactions of the american Institute of mining engineers (1893).

Quincke. — Isolants céramiques pour les très hautes températures, Zeits. der Vereins deutscher ingenieurs, t. XL, p. 101-102.

Struthers. — Pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier School of mines Quarterly, New-York, t. XII.

E. Damour. — Bulletin de l'Association amicale des anciens élèves de l'École des mines (mars 1889).

H. Howe. — Données pyrométriques. — Engineering and mining Journal, t. L (1890), p. 426.

PYROMÈTRE A RADIATION CALORIFIQUE.

Violle. — Radiation solaire Ann. Chim. et Phys., 5e série, t. XX (1877), p. 289. — Journal de physique (1876), p. 277.

Rosetti. — Ann. Chim. et Phys., t. XVII (1879), p. 177. — Phil. mag., t. VIII (1879), p. 324.

M. Deprez et d'Arsonval. — Société de physique, 5 février 1886.

Du Boys. — Radiomicromètre (Phil. trans. of R. S., t. CLXXX (1887), p. 159.

Wilson et Gray. — Température du soleil. Phil. trans. of R. S., t. CLXXXV (1894), p. 361.

Langley. — Bolomètre. American Journal of Science, t. XXI (1881), p. 187 ; t. XXXI (1886), p. 1 ; t. XXXII (1886), p. 90 ; Journal de physique, t. IX, p. 59.

PYROMÈTRE A RADIATION LUMINEUSE.

Kirchhoff. — Ann. Chim. et Phys., t. LIX (1860), p. 124.

Ed. Becquerel. — Mesure optique des températures. — C. R., t. LV (1863), p. 826. — Ann. Chim. et Phys., t. LXVIII (1863), p. 49.

Violle. — Radiation du platine. C. R., t. LXXXVIII (1879), p. 171 ; t. XCI (1881), p. 866 et 1204.

Crova. — C. R., t. LXXXVII, 322 et 329 ; t. XC, 252 ; t. XCII, 36 et 707 ; t. CXIV, 941.

Le Chatelier. — Pyromètre optique. C. R., t. CXIV (1892), p. 214. — J. de physique, 3e série, t. I (1892). — Industrie électrique, avril 1892. — Sur la température du soleil. C. R., t. CXIV (1892), p. 737. — Sur les températures des foyers iudustriels. C. R., t. CXIV (1892), p. 470.

Stefan. — Wien. Ber., t. LXXIX (1879), p. 391.

PYROMÈTRE PAR RETRAIT.

Wedgwood. — Phil. trans. of royal Soc., t. LXXII (1782), p. 305; t. LXXIV (1784), p. 358.

Guyton de Morveau. — Ann. Chim. et Phys., 1re série, t. XLVI (1803), p. 276; t. LXXIII (1810), p. 254; t. LXXIV (1810), p. 18 et 129; t. XC (1814), p. 113 et 225.

PYROMÈTRE PAR FUSIBILITÉ.

Lauth et Vogt. — Mesures pyrométriques. Bull. soc. chim., t. XLVI (1886), p. 786.

Seger. — Thorindustrie Zeitung (1885), p. 121 et (1886), p. 135 et 229.

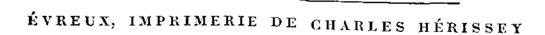
PYROMÈTRES ENREGISTREURS.

Le Chatelier. — Étude sur les argiles. C. R., t. CIV (1887), p. 1443.

Roberts Austen. — First report of the alloys research committee. Proc. of Inst. of Mechanical engineers (1891), p. 543. — Journ. of soc. of chem. industry, t. XVI (1896), p. 1 à 9. — Proc. of Inst. of Mechanical engineers (1897).

G. Charpy. — Étude sur la trempe de l'acier. Bull. de la Soc. d'encouragement, 4e série, t. X (1895), p. 666.

Callendar. — Pyromètre enregistreur au platine. — Engineering, 26 mai 1899, p. 675.



ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

MARS 1900

Georges *CARRÉ* *et* *C. NAUD*, *Éditeurs*

Catalogue de la Bibliothèque

DE LA

Revue générale des Sciences



PARIS

3, rue Racine, 3

Avis

Envoi ***franco*** sur demande des Catalogues spéciaux détaillés par ordre de matières.

Catalogue général.

Catalogue des Livres de sciences (Mathématiques — Physique — Chimie).

Catalogue des Livres de médecine et Sciences naturelles.

Catalogue technologique (Électricité — Agriculture — Photographie).

Catalogue des périodiques.

Catalogue de la Bibliothèque technologique.

Catalogue de la Collection Scientia.

MM. Georges CARRÉ et C. NAUD feront, pendant **un mois**, à toute personne qui leur en fera la demande, le **service gratuit** de leurs publications périodiques.

Tous les ouvrages annoncés sont expédiés **franco** *aux prix marqués, en France et à l'Étranger, contre envoi d'un mandat postal, de timbres-poste ou d'une valeur à vue sur Paris. Pour les envois* **recommandés,** *envoyer* 0 *fr.* 25, *en plus, par ouvrage.*

Expédition contre remboursement de toute commande non accompagnée du montant. — *Pour l'étranger, les frais de remboursement restent à la charge du client.*

IMPRESSION des ouvrages scientifiques à formules, THÈSES de médecine, de Sciences mathématiques, physiques et naturelles et de Géographie. Envoi de devis sur demande. Prix très modérés.

N° 49 *bis.*

(1 vol., 226 p., 50 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Jacques BOYER

Histoire des Mathématiques

Suivre à travers les âges, — depuis les anciens peuples de l'Orient jusqu'à la fin du XIXe siècle, — l'évolution des Mathématiques : tel est le but de cet ouvrage destiné principalement aux étudiants. L'auteur a voulu rester *très élémentaire*. Son récit n'est pas surchargé de formules ou d'équations. Tout luxe d'érudition a été banni de ce volume où les personnes, même peu versées dans la science des Euclide et des Newton, apprendront sans fatigue l'histoire des découvertes mathématiques les plus saillantes.

Comme plan général, M. Boyer a adopté l'ordre chronologique de préférence aux autres dispositions. En effet, l'Arithmétique ou la Géométrie ont pu être, à certaines époques, plus cultivées que l'Algèbre, l'Analyse, la Mécanique ou la Trigonométrie, mais le développement des diverses branches de la Mathématique s'enchevêtre néanmoins d'une manière trop intime pour être traité, science par science, dans des chapitres séparés. Les inconvénients d'une telle méthode sautent d'ailleurs aux yeux : la caractéristique de chaque période ne se dégage pas, les redites sont inévitables et la marche générale du progrès n'apparaît plus que confusément.

Quant à l'illustration du livre, elle est exclusivement *documentaire*. Les fac-similés de manuscrits, d'ouvrages anciens ou de portraits sont des reproductions photographiques d'originaux existant dans des collections publiques ou privées. Leur authenticité a été soigneusement contrôlée et leur source toujours indiquée. Enfin une table très détaillée des noms cités et des matières traitées rend aisée et rapide la recherche d'un renseignement. Cette Histoire des Mathématiques a donc sa place marquée, comme *livre de référence*, dans toute bibliothèque scientifique.

TABLE DES CHAPITRES

(1 vol., 204 p., 48 fig., 10 pl. hors texte)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

H. BRILLIÉ
Ingénieur des Constructions navales.

Torpilles et Torpilleurs

Les événements les plus importants survenus dans l'histoire de la marine au XIX[e] siècle sont l'adoption de la torpille comme engin de guerre et la création du torpilleur à grande vitesse. Le torpilleur, en permettant d'utiliser la torpille comme arme d'attaque, a profondément modifié les règles de la tactique navale ; s'il n'est pas appelé, comme le proclamaient, il y a quelque dix ans, ses partisans enthousiastes, à devenir le roi des mers, il n'en reste pas moins un adversaire redoutable avec lequel doivent compter les plus puissants cuirassés.

De l'apparition du torpilleur à grande vitesse, date la révolution qui s'est opérée depuis vingt ans dans la construction des flottes européennes.

L'auteur de cet ouvrage s'occupe tout d'abord de la torpille et étudie cet engin dans ses divers emplois pour la défense des côtes et l'attaque des escadres. En second lieu, il aborde l'étude des torpilleurs et s'efforce de montrer les progrès réalisés depuis vingt-cinq ans dans la construction de leurs coques, de leurs machines et de leurs chaudières. Enfin il passe en revue les flottilles des torpilleurs des différentes puissances et le rôle que ces petits bâtiments sont appelés à jouer dans les guerres navales de l'avenir.

Ce n'est pas seulement à l'ingénieur et au marin que ce livre s'adresse ; tous ceux qui s'intéressent à l'évolution de notre marine, à ses progrès, liront ces pages avec un intérêt que la guerre hispano-américaine rend d'actualité et que les récentes modifications apportées au programme de nos divisions navales ne peuvent qu'accentuer.

(*Revue du Cercle militaire*).

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE. — **Torpilles.**

DEUXIÈME PARTIE. — **Les Torpilleurs.**

TABLE DES FIGURES

(1 vol., 182 p., 141 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
Prix : **5** francs.

Paul BUSQUET
Médecin-major de 2e classe,
Chef du Laboratoire de Bactériologie de l'hôpital militaire d'Alger,
Lauréat de la Faculté de médecine de Lyon,
Lauréat du Ministère de la guerre.

Les Êtres vivants

Organisation — Évolution

Les idées qui sont exposées dans cet ouvrage ont été énoncées, il y a plus de quinze ans, pour la première fois, par le savant professeur Kunstler. Accueillies tout d'abord avec indifférence, puis discutées vivement, elles ont enfin acquis droit de cité dans le vaste domaine de la philosophie scientifique et se trouvent aujourd'hui confirmées et soutenues par les travaux récents de M. Yves Delage, l'éminent professeur de la Sorbonne.

Dès 1882, à la conception spéciale de la « théorie cellulaire », toute puissante et acceptée universellement par les auteurs, Kunstler opposa des vues élargies et la compléta par la théorie de la sphérule, qui avait pour point de départ autre chose que de vagues conceptions hypothétiques et reposait sur de nombreux faits positifs d'observation.

Pour la première fois, la valeur morphologique de la cellule, en tant qu'individualité distincte primitive, était nettement contestée, et la théorie coloniale elle-même se trouvait ébranlée par les arguments puissants mis en avant. Soutenir que les cellules des animaux ne sont pas des éléments anatomiques à valeur primordiale fixe et immuable était une conception nouvelle.

Deux autres auteurs, Sedgwick et Whitman, tentèrent, eux aussi, d'émettre quelques objections contre la théorie cellulaire; l'indifférence générale leur répondit. Enfin, plus récemment, M. le Professeur Delage reprit ces théories et en fit le sujet d'une remarquable étude. En fournissant ainsi aux adversaires de la théorie cellulaire l'appoint précieux de son talent et l'autorité de sa situation officielle, le savant professeur de zoologie de la Sorbonne a contribué puissamment à vulgariser les idées que la trop grande modestie de Kunstler, et son peu d'empres-

sement à renouveler et à multiplier les publications sur ses conceptions théoriques, n'avaient pas assez fait connaître du grand public scientifique.

Les documents de l'auteur n'ont pas été seulement puisés à l'enseignement magistral de son maître, à ces leçons qui, s'adressant à un public plutôt inexpérimenté, sont forcément un peu abstraites et simplifiées à dessein; ils ont été, encore et surtout, recueillis dans ces conversations scientifiques d'une si agréable familiarité et d'un charme persuasif si puissant, dont une vie de laboratoire et de persévérantes habitudes de travail en commun fournissent chaque jour tant d'occasions.

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 164 p., avec fig., 1 pl. en chromolithographie)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

R. COLSON
Capitaine de génie,
Répétiteur de Physique à l'École polytechnique.

La Plaque photographique

Propriétés, le visible, l'invisible

Après un coup d'œil général sur les propriétés de la couche sensible et sur le principe de sa préparation et de son emploi, l'auteur passe en revue dans les quatre premiers chapitres les influences chimique, lumineuse, calorifique, mécanique et électrique ; on trouvera en particulier, dans les deux premiers qui contiennent la base de la photographie, une discussion approfondie sur la formation de l'image latente et l'opération du développement avec des considérations nouvelles sur le rôle de la matière organique, la gélatine.

Le chapitre v contient un exposé d'une clarté supérieure de la grande découverte du professeur Rœntgen, les rayons X.

Dans le chapitre vi, l'auteur remet au jour les anciennes expériences de Niepce, de Saint-Victor, relatives à l'emmagasinement de la lumière, qui ouvrent la voie sur un terrain immense, encore très peu exploré et bien propre à séduire les chercheurs ; elles se rattachent directement à la photographie de l'invisible. Celle-ci, dans laquelle est comprise la photographie à travers des corps opaques, fait l'objet du chapitre xii, qui renferme les expériences exécutées récemment sur ce sujet.

L'auteur indique aussi certaines précautions à prendre dans la conservation et dans l'emploi des plaques.

Cet ouvrage sera utile à tous ceux qui s'occupent de photographie, en leur faisant connaître l'instrument qu'ils emploient, et à tous ceux qui s'intéressent aux nouvelles recherches, en leur fournissant, en même temps que des indications suggestives, des documents précis et mis au point.

Telle est la marche suivie par M. Colson dans son étude qu'il a voulu rendre, nous dit-il dans la préface, *intelligible à tous*. C'est en effet un volume de vulgarisation que *la plaque photographique*, mais quand un ouvrage de ce genre sort de la main d'un maître, il est de nature à intéresser non seulement les photographes amateurs, dont le nombre augmente chaque jour, et le grand public, mais aussi les spécialistes proprement dits et les savants.

(*Le Cosmos*, 5 juin 1897).

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 284 p., 56 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

J. DUGAST,
Directeur de la Station agronomique
et œnologique d'Alger.

Vinification dans les Pays chauds

Algérie et Tunisie

Depuis quelques années, des œnologues distingués ont publié, tant en France qu'à l'étranger, des traités de vinification très complets. A côté de ces ouvrages qui ont tous leur utilité, l'auteur a pensé qu'il y avait place pour un livre écrit spécialement pour la vinification en Algérie et en Tunisie. Il est nécessaire pour bien exposer cette partie de la science agronomique d'avoir soi-même fait des recherches de laboratoire. Il n'est pas moins utile d'avoir appris la pratique de la vinification dans le cellier. C'est parce que l'auteur a fait cette double expérience de la théorie et de la pratique qu'il s'est cru autorisé à entreprendre cette tâche.

Tout en tenant compte des travaux antérieurs, souvent cités, il a adopté un plan nouveau et s'est efforcé de faire une œuvre originale.

Quant aux conditions des fermentations dans les pays chauds, sur lesquelles l'auteur insiste particulièrement, elles sont appuyées sur les résultats des nombreuses expériences faites à la station agronomique dans cet ordre d'idées. Ce traité est un ouvrage complet, à la fois scientifique et pratique, mais sans détails inutiles, où le lecteur trouvera des faits et des opinions nettement exprimés.

Mais, avant tout, ce livre est écrit dans le but d'être utile aux viticulteurs.

TABLE DES MATIÈRES

Transformation du raisin en vin.

CHAP. V. — FERMENTATION ALCOOLIQUE. — Reproduction des levures. — Classification des levures. — Polymorphisme des levures. — Composition des levures. — Nutrition de la levure. — Aliments azotés. — Aliments hydrocarbonés. — Aliments minéraux. — CIRCONSTANCES QUI FAVORISENT OU ENTRAVENT LA FERMENTATION ALCOOLIQUE. — Influence des agents chimiques et physiques. — Quantité de levure. — Pression. — Concentration du moût. — Alcool. — Oxygène. — Acide carbonique. — Acidité. — Alcools sulfureux. — Produits d'excrétions. — Équation de la fermentation alcoolique. — Chaleur dégagée pendant la fermentation. — Purification des levures.

CHAP. VI. — AMÉLIORATION DE CERTAINES VENDANGES. — Manque d'acidité. — Acide tartrique. — Plâtrage. — Phosphatage. — Manque de sucre. — Levures cultivées.

CHAP. VII. — CELLIER. — Vases vinaires à fermentation. — Cuves. — Foudres et tonneaux.

CHAP. VIII. — VINIFICATION EN ROUGE. — Fouloir. — Egrappage. — Egrappoirs. — Cuvaison. — Aération de la vendange. — Méthodes de cuvages. — Chapeau flottant. — Chapeau submergé. — Cuvage en deux temps. — Température des fermentations. — Influence de la température sur le travail des levures. — Influence de la température sur la constitution et la qualité des vins. — Influeuce de la température sur la tenue des vins. — Moyens pour atténuer les effets de la chaleur. — Réfrigération des moûts. — Emploi de la glace. — Réfrigérants. — Prise de la température des cuves. — Durée de la cuvaison. — Décuvage.

CHAP. IX. — PRESSOIRS. — Epuisement des marcs fermentés par déplacement.

CHAP. X. — VINIFICATION EN BLANC. — Soufrage du moût. — Epuisement de la vendange par diffusion et déplacement. — Vinification en blanc des raisins rouges. — Vinification en blanc des raisins rouges basée sur les propriétés de l'oxydase.

CHAP. XI. — PROCÉDÉ DE VINIFICATION BASÉ SUR LA STÉRILISATION DU MOUT PAR LA CHALEUR.

CHAP. XII. — VINIFICATIONS SPÉCIALES. — Vins rosés. — Vins de liqueurs. — Vins de liqueur naturels. — Mutage au soufre. — Vins de liqueur par maturation artificielle des raisins. — Vins de liqueur artificiels. — Mistelles. — Vins nouveaux. — Vins champagnisés. — Vins mousseux artificiels.

CHAP. XIII. — UTILISATION DES SOUS-PRODUITS DE L'INDUSTRIE VINICOLE. — Marcs. — Fabrication des piquettes. — Marcs de vins blancs. — Tartres. — Lies.

CHAP. XIV. — SOINS A DONNER AUX VINS. — Soutirage et outillage. — Conservation et vieillissement des vins.

CHAP. XV. — DÉFAUTS DES VINS. — Verdeur. — Amélioration des vins acides. — Vin plat. — Vin salé. — Vins sulfatés. — Vins sucrés. — Vin trouble. — Brunissement. — Goût de fût, de moisi, etc.

CHAP. XVI. — MALADIES DES VINS. — Fleur du vin. — Ascescence. — Vinaigre de vin. — La pousse du vin. — La tourne. — La graisse. — L'amertume. — Mannite. — Casse.

CHAP. XVII. — TRAITEMENT DES VINS MALADES. — Chauffage. — Collage. — Filtrage. — Désinfection et assainissement des vases vinaires.

CHAP. — XVIII. — DÉTERMINATION DE LA VALEUR DES VINS. — Extrait sec. — Acidité totale.

J. Willard GIBBS
Professeur au collège Yale, à New-Haven.
Traduit par
Henry LE CHATELIER
Ingénieur en chef des Mines,
Professeur au Collège de France.

(1 vol., 212 p., 10 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Équilibre des Systèmes chimiques

EXTRAIT DE LA PRÉFACE DU TRADUCTEUR

L'œuvre thermodynamique du professeur J. Willard Gibbs comprend trois parties distinctes, qui ont fait l'objet de mémoires séparés, publiés successivement dans les transactions de l'Académie du Connecticut.

Représentation géométrique des propriétés thermodynamiques des corps (décembre 1873).

Équilibre des systèmes hétérogènes. *1re partie.* — Phénomènes chimiques (juin 1876).

Équilibre des systèmes hétérogènes. *2e partie.* — Capillarité et électricité (juillet 1878).

C'est le second de ces mémoires, de beaucoup le plus important des trois, dont on donne ici la traduction. Sa publication restera dans l'histoire de la chimie un événement capital. La découverte par H. Sainte-Claire Deville de la dissociation, ou pour s'exprimer d'une façon plus précise, de la *réversibilité des phénomènes chimiques,* n'avait pas tout d'abord été appréciée à sa juste valeur par les chimistes qui avaient été beaucoup plus frappés de la limitation des réactions que de leur réversibilité. Les conséquences de cette réversibilité, et en particulier la possibilité d'appliquer à la chimie les principes de la thermodynamique, n'avaient pas été aperçus d'une façon précise. MM. Moutier et Peslin avaient seulement indiqué que les systèmes à tension fixe de dissociation devaient satisfaire à la formule de Clapeyron. C'est au professeur W. Gibbs que revient l'honneur d'avoir, par l'emploi systématique des méthodes thermodynamiques, créé une nouvelle branche de la science chimique dont l'importance, tous les jours croissante, devient aujourd'hui comparable à celle de la chimie pondérale créée par Lavoisier.

La portée des travaux du professeur W. Gibbs n'a pourtant pas été immédiatement reconnue; leur influence sur les progrès de la science n'a pas été tout d'abord ce qu'elle aurait dû être. Les chimistes se sont trop longtemps désintéressés d'idées qui leur étaient présentées sous une forme difficilement accessible. Bien peu d'entre eux étaient en état de comprendre une œuvre écrite par un mathématicien paraissant

ignorer les idées ou préjugés de ses lecteurs et dédaigner leurs préoccupations expérimentales. Des pages entières sont consacrées à l'étude de phénomènes dont la probabilité n'est qu'un infiniment petit, parfois même du 4ᵉ ordre, tandis que quelques lignes à peine sont consacrées à énoncer des lois nouvelles et d'une importance capitale s'appliquant à tous les phénomènes de la chimie ; aussi ces lois ont-elles passé complètement inaperçues. Le savant professeur d'Amsterdam, Van der Waals, a découvert, dans l'œuvre de Gibbs, deux lois semblables et les a expliquées aux chimistes : la *loi des phases* et les règles relatives à l'*état critique* dans les mélanges. Il est inutile de rappeler l'importance des recherches expérimentales auxquelles ces deux lois ont conduit les savants hollandais. Mais la plupart des lois semblables n'ont été ainsi reconnues qu'après avoir été découvertes à nouveau d'une façon tout à fait indépendante. C'est ainsi que les lois de l'équilibre chimique énoncées par M. Van't Hoff et par moi ont été ensuite retrouvées par M. Mouret dans le mémoire de Gibbs. Il est probable qu'il reste encore dans ce travail bien des points à approfondir, c'est là un des motifs qui m'ont engagé à en publier une traduction française. Je me suis astreint à la faire aussi littérale que possible pour éviter de modifier à mon insu la pensée de l'auteur.

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 138 p., 25 fig., 10 pl.
hors texte).
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Alexandre HÉBERT
Préparateur à la Faculté de médecine.

La technique des Rayons X

MANUEL OPÉRATOIRE

de la Radiographie et Fluoroscopie

A L'USAGE DES

Médecins, Chirurgiens et Amateurs de photographie

La découverte prestigieuse du professeur de Würtzbourg était à peine connue que les savants de tous les pays s'en emparaient. En quelques semaines, un nombre prodigieux de travaux furent publiés tant au point de vue philosophique qu'au point de vue expérimental.

L'étude de la question serait extrêmement laborieuse pour quiconque voudrait compulser les nombreux mémoires parus en toute langue dans les différents journaux scientifiques. De plus, ces mémoires conçus à un point de vue scientifique d'un degré très élevé, sont pour la plupart peu à la portée de la majorité de ceux auxquels les rayons X sont susceptibles de rendre service.

Un livre qui, se dégageant des vues théoriques émises, qui, coordonnant les résultats pratiques obtenus, qui, conçu et écrit très clairement, pourrait être lu avec profit par l'homme de science ou l'amateur instruit, aurait certes un grand succès.

L'ouvrage de M. Hébert que nous présentons au public est dans ce cas. Sans être ni trop complètement théorique, ni entièrement documentaire, ce livre vise surtout à être pratique et à permettre à quiconque de reproduire les belles expériences sorties de nos grands laboratoires.

Ce livre rendra des services aux médecins, chirurgiens, et mettra le grand public lui-même en état de reproduire les expériences de M. Rœntgen. Le chimiste lui aussi en tirera le plus grand profit, étant donnée l'application que l'on peut faire des Rayons X à l'analyse, par exemple la recherche des falsifications du safran, des tissus, à la différenciation des pierres fausses des vraies, etc.

(*Revue de Chimie analytique appliquée*, 2 septembre 1897).

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES FIGURES

TABLE DES PLANCHES (hors texte)

(1 vol., 338 p., 102 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

R. HOMMELL
Ingénieur agronome,
Professeur d'Agriculture à Riom (Puy-de-Dôme),
Membre fondateur de la Société centrale d'Apiculture.

L'Apiculture

par les méthodes simples

Le *Traité d'Apiculture par les méthodes simples* est l'œuvre d'un praticien qui exploite lui-même d'importants ruchers ; les débutants y trouveront un guide précieux et sûr, toujours clair et précis, qui leur évitera les tâtonnements et les fautes ; les personnes déjà versées dans l'art apicole le liront aussi avec profit et pourront ensuite apporter des modifications utiles aux procédés qu'ils emploient.

Le chapitre I est consacré à l'étude de la biologie des Abeilles, à la description des diverses races. La cire et les rayons, le miel, les plantes mellifères, le pollen, l'eau et la propolis font l'objet du chapitre II. Le chapitre III traite de l'accroissement des colonies, de la ponte et de l'essaimage naturel.

Dans les chapitres IV, V, VI, VII et VIII est étudié, avec les détails les plus minutieux, tout ce qui est relatif à l'établissement du rucher, au choix raisonné de la ruche et à sa manipulation, pour l'outillage nécessaire, le peuplement des ruches, l'essaimage artificiel, la conduite du rucher pendant toute l'année, la récolte et la vente du miel, la récolte et la purification de la cire, les falsifications et l'analyse du miel et de la cire, enfin les dérivés du miel : hydromel, œnomel, vinaigre et eau-de-vie.

Les chapitres IX et X contiennent tout ce qui est relatif aux maladies des Abeilles et à la statistique apicole.

Ce livre est avant tout un livre pratique sans pour cela être dépourvu des théories indispensables en pareille matière. La plupart des figures sont inédites et leur grand nombre en ajoutant à l'intelligence du texte lui enlève toute obscurité et toute sécheresse.

En résumé, l'ouvrage de M. Hommell est sans doute le plus complet qui existe à l'heure actuelle sur la matière ; il sera le guide indispensable de tout ceux qui se proposeront de créer et de conduire un rucher avec le minimum de travail et le maximum de produit.

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 188 p., 56 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Alphonse LABBÉ
Docteur ès sciences,
Conservateur des Collections zoologiques
à la Sorbonne.

La Cytologie expérimentale

Essai de Cytomécanique

Cet ouvrage est la mise au point sommaire, mais précise, des expériences récentes de mécanique cellulaire, de *cytomécanique*, de cette jeune science qui veut connaître expérimentalement, non seulement ce qu'est une cellule en elle-même, mais ce que sont les divers organes cellulaires, et aussi quelles sont les relations réciproques de ces organes et les rapports de la cellule vis-à-vis du milieu ambiant ou des autres cellules.

L'auteur étudie successivement les expériences faites pour reproduire artificiellement le protoplasma et les figures karyokinétiques, l'action des agents physico-chimiques sur la structure et les mouvements des cellules ; les relations du noyau et du cytoplasma ; les modifications expérimentales de la mitose et de la segmentation de l'œuf.

Deux chapitres sont consacrés à l'adaptation au milieu et aux tropismes et tactismes. Enfin un chapitre important discute les causes de la différenciation cellulaire, question des plus graves, puisqu'elle est la base même du problème de l'hérédité et de l'évolution des espèces.

Ce livre sera utile non seulement aux naturalistes et aux biologistes qu'intéressent les grandes questions de biologie générale, mais aussi aux étudiants qui y trouveront exposée et développée l'importante partie de leur programme relative à la biologie cellulaire.

(*Revue scientifique*, 24 décembre 1898).

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 296 p., 5 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

C.-A. LAISANT
Examinateur
d'admission à l'École polytechnique,
Docteur ès sciences.

La Mathématique

Philosophie — Enseignement

« Dans la première partie, la plus longue de l'ouvrage, l'auteur cherche à définir cet objet multiple, variable à l'infini, que la Mathématique doit étudier, et à élever une classification des sciences mathématiques qui soit sensiblement d'accord avec la tradition et qui soit justifiée par la nature des questions que chacune d'elles étudie.

« Toute la deuxième partie de l'ouvrage est pleine de réflexions ingénieuses, intéressantes, qui ne peuvent manquer d'être profitables à la classe nombreuse des étudiants qui, sans avoir encore approfondi aucun point de la science mathématique, ont cependant sur les principales parties de cette science des notions déjà étendues. Je signalerai plus particulièrement, et pour les louer sans réserve, les idées de l'auteur sur les nombres incommensurables, négatifs et imaginaires et celles qu'il développe à propos d'une opération générale, peut-être un peu trop négligée aujourd'hui et qu'il désigne par cette locution : *retour de l'abstrait au concret*.

Dans la troisième partie. . . . .

« L'auteur affirme que toute intelligence moyenne est apte à recueillir un enseignement mathématique assez complet pour être utilisé à un grand nombre de points de vue et pour assurer à celui qui le possède des idées raisonnables sur toute cette science mathématique jugée si faussement et si médiocrement aujourd'hui par l'immense majorité de ceux qui font cependant partie de la classe éclairée de la nation ; il pense que l'on ne saurait commencer trop tôt cet enseignement, qu'il y a tout avantage à en mener de front les diverses parties, arithmétique, algèbre et géométrie, et qu'il vaut mieux ne rien faire du tout que de consacrer une classe unique de une heure et demie par semaine à développer un tel programme ; il croit que pour cet enseignement, comme pour tout autre d'ailleurs, il faut de la continuité dans les efforts, le temps matériel de revenir au besoin en arrière, de reprendre les points difficiles et de les illustrer par des exemples jusqu'à ce qu'ils se soient gravés dans l'esprit de l'élève.

« Il faut savoir gré à M. Laisant d'avoir appelé l'attention sur ce point capital. Si son livre devait être un des facteurs essentiels d'une réforme désirable à tant de points de vue, l'auteur pourrait se vanter, non seulement d'avoir écrit dans un style éloquent et clair un livre intéressant et instructif, mais encore d'avoir rendu un éminent service à son pays. »

E. H.

(*Revue des Mathématiques spéciales*, Juin 1898).

TABLE DES MATIÈRES

H. LE CHATELIER
Professeur de Chimie minérale au Collège de France,
Ingénieur en chef au corps des Mines,
et
O. BOUDOUARD
Préparateur au Collège de France.

(1 vol., 220 p., 52 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Mesure des Températures élevées

Depuis Wedgwood, bien des savants se sont occupés de la mesure des températures élevées, mais avec un succès inégal. Trop indifférents aux choses pratiques, ils ont surtout envisagé le problème comme un prétexte à dissertations savantes. La nouveauté et l'originalité des méthodes les attiraient plus que la précision des résultats et la facilité des mesures. Aussi jusqu'à ces dernières années, la confusion a-t-elle été en croissant.

Ainsi les expériences sur le rayonnement solaire qui ont conduit à des évaluations variant de 1 500 à 1 000 000 de degrés s'appuyent sur des mesures ne différant pas entre elles de 25 p. 100.

Pour sortir de cette confusion, il a fallu d'abord s'entendre sur une échelle unique des températures ; celle du thermomètre à gaz est universellement adoptée aujourd'hui, et l'on peut considérer ce choix comme définitif.

L'auteur se propose, dans l'introduction de cet ouvrage, de passer rapidement en revue les différentes méthodes pyrométriques (c'est-à-dire thermométriques utilisables aux températures élevées), dont l'emploi peut être avantageux dans telle ou telle circonstance ; il décrit ensuite plus en détail chacune d'elles et discute les conditions de leur emploi. Mais, avant tout, il précise dans quelles limites les différentes échelles peuvent être repérées par rapport à celle du thermomètre normal à gaz ; c'est l'insuffisance de ce repérage qui, aujourd'hui encore, est la cause des erreurs les plus importantes dans la mesure des températures élevées. L'abondance des vues originales sur un sujet qui intéresse particulièrement la grande industrie rend la lecture de cet ouvrage indispensable à tous les ingénieurs des usines, fonderies, haut fourneaux et, en général, à tous ceux qu'une question aussi importante est à même d'intéresser au double point de vue théorique et pratique.

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 200 p., 12 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Georges MAUPIN
Licencié ès sciences mathématiques et physiques,
Membre de la Société Mathématique de France.

Opinions et Curiosités

touchant la Mathématique

Pendant les XVIe, XVIIe et XVIIIe siècles.

Quelles opinions avaient de l'utilité des mathématiques dans les siècles précédents non seulement les savants, mais surtout les faiseurs de livres et même les ignorants? Quels avantages pensait-on en retirer pour l'éducation; quelle liaison singulière voulait-on établir entre la doctrine mathématique et la religion? Voilà ce qui est traité dans ce volume. En donnant des extraits curieux et piquants des auteurs qu'il cite, M. Maupin ne s'est permis d'y ajouter que de brefs commentaires et de courtes notes biographiques, ne voulant rien ôter de leur caractère aux textes mentionnés. Ajoutons que ce n'est pas là un ouvrage savant et que, dans ses parties les plus saillantes, on s'est efforcé de le rendre intelligible à tous ceux qui ont en mathématiques des connaissances moyennes. Ce livre a, par ailleurs, un côté documentaire qui séduira les personnes qu'intéresse l'évolution de l'esprit mathématique à travers les graves querelles d'écoles et les discussions brûlantes des dogmatistes. — Les mathématiciens trouveront un vif intérêt à cette excursion rétrospective dans le domaine de la géométrie, et les curieux, que n'effrayent pas les soutenances imprévues, prendront plaisir à l'intervention des mathématiques dans le dogme de la Présence réelle. — D'autre part, le volume de M. Maupin, en tout décidément instructif, nous donne en manière d'actualité, des aperçus originaux sur ce que pensaient de l'utilité du latin dans l'enseignement les maîtres d'autrefois. — Bien des idées que nous émettons aujourd'hui sur ce sujet sont, à la vérité, celles d'hier et nous devons au livre de M. Maupin la satisfaction de l'apprendre.

TABLE DES MATIÈRES

CHAP. XI. — Du point géométrique. — Histoires de sorciers. — S'il est expédient aux femmes d'être savantes (Académie française, année 1667).

CHAP. XII. — La géométrie de Port-Royal. — Orgueil des géomètres. — Avantages de la géométrie pour l'éducation. — Définitions d'Euclide. — Démonstrations par l'absurde (Antoine Arnaud, Nicole, 1667).

CHAP. XIII. — Barrême l'arithméticien. — Dédicace en vers de son œuvre (Barrême, 1671 et 1673).

CHAP. XIV. — Preuve de l'existence de Dieu tirée de la considération des espaces asymptotiques (le jésuite Pardies, 1673).

CHAP. XV. — La géométrie françoise (quadrature du cercle) (De Beaulieu, ingénieur, 1676).

CHAP. XVI. — Essence divine du point géométrique. — Vertus du dattier, du figuier, de l'olivier (le R. P. Léon, 1679).

CHAP. XVII. — Les opinions religieuses d'un professeur de mathématiques sous Louis XIV. — Editeurs et auteurs (Rohault, œuvres posthumes, 1682).

CHAP. XVIII. — A quel âge il faut apprendre l'arithmétique et la géométrie. — Etudes qui conviennent aux femmes (M[e] Claude Fleury, abbé du Loc-Dieu, 1686).

CHAP. XIX. — Les mathématiques modèrent les passions. — Leur introduction à l'Université d'Angers (Prestet, prêtre, 1689).

CHAP. XX. — Résolution sur le jeu de hasard, faite en Sorbonne le 25 juin 1697.

CHAP. XXI. — Les mathématiques et le salut de l'âme (de Neuveglise, prêtre, 1700).

CHAP. XXII. — Les mathématiques, la mathématique. — Enseignement de la philosophie dans l'Université de Paris (le P. Lamy, 1706).

CHAP. XXIII. — La contrefaçon des livres de Paris en 1706 (Jean Richard).

CHAP. XXIV. — Essai de quadrature du cercle par la courbe de Dinostrate (Remy Baudemont, 1712).

CHAP. XXV. — Problèmes curieux sur les combinaisous (Ozanam, 1725).

CHAP. XXVI. — Danger social de l'éducation monastique. — Inconvénients de l'enseignement des collèges. — Nécessité de commencer tôt l'étude des mathématiques (La Chalotais, 1763).

CHAP. XXVII. — Les mathématiques et les Pères de l'Église. — Du plaisir spirituel que donne l'étude de la géométrie. — Une méthode pour calculer π (le P. Lamy, de l'Oratoire, 1731 et 1738).

CHAP. XXVIII. — Introduction des mathématiques dans les classes de philosophie de l'Université de Paris (Rivard, professeur en l'Université (1738).

CHAP. XXIX. — Sauveur et M[me] de La Sablière. — Opinion de Bossuet sur la médecine, d'après Fontenelle. — Démonstration du carré de l'hypoténuse (Sauveur, édition posthume, 1753).

CHAP. XXX. — Dispositions naturelles des jeunes enfants pour les mathématiques. Cette étude fortifie leur raisonnement et les rend dans la suite aptes à commander (l'abbé de la Chappelle, censeur royal, 1743 et 1756).

CHAP. XXXI. — Un géomètre n'est pas forcément dénué de sens commun. — Du raisonnement géométrique. — Défectuosité des livres de géométrie. — Sécheresse d'esprit des mathématiciens (d'Alembert, 1758 et 1759).

CHAP. XXXII. — Fénelon, Bossuet et les mathématiques. — Théorèmes de Varignon sur la Présence réelle (d'après d'Alembert, Condorcet, le P. Nicéron).

CHAP. XXXIII. — L'art d'enseigner. — Manque de savoir-vivre de l'écolier. — Danger des longs sermons. — Ruse d'auteur (l'abbé de la Chappelle, 1763).

CHAP. XXXIV. — Essai de quadrature du cercle tenté sous l'invocation du Saint-Esprit (De Vausenville, 1771).

CHAP. XXXV. — Lettres à une jolie femme sur le cadastre (D. de V., 1814).

CHAP. XXXVI. — Note relative à l'état des mathématiques avant le XVI[e] siècle et à l'Université de Paris.

CHAP. XXXVII. — Note sur Charles de Bovelles : ses relations avec Oronce Fine et avec Loffroi, abbé d'Ourscamp.

(1 vol., 215 p., 12 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

C. PAGÈS
Vétérinaire de Paris et du département de la Seine,
Docteur en médecine, Docteur ès sciences.

Méthodes pratiques en Zootechnie

Dans cet ouvrage, l'auteur a poursuivi un triple but : 1° faire connaître à tous ceux qui désirent acquérir une instruction supérieure en cette matière ce que la Zootechnie a de définitivement acquis ; — 2° montrer aux hygiénistes les grands progrès accomplis dans l'élevage des animaux en leur indiquant tout le bénéfice qu'on peut en tirer pour l'homme ; — 3° apaiser le conflit qui existe, dans l'industrie de la vie, entre les théoriciens et les praticiens, et prouver, par la systématisation des observations empiriques, que ces derniers ont le plus souvent raison.

La première partie est consacrée à la Zootechnie générale : on y trouvera sur l'habitation, l'entraînement, l'alimentation, etc..., nombre de renseignements nouveaux. La deuxième partie traite des diverses opérations zootechniques, d'abord d'une manière générale, ensuite spécialement. Non seulement l'auteur a étudié les animaux de boucherie et les animaux moteurs, les seuls qui ont paru intéresser jusqu'ici les zootechniciens, mais encore les animaux affectueux et gardiens, tout en accordant aux premiers les plus grands développements. On y trouvera sur l'engraissement, sur l'élevage des animaux de sang, sur le chien de garde, sur les animaux de combat, des observations pratiques très importantes dont personne jusqu'ici n'avait parlé.

(*L'Éleveur*, 27 novembre 1898).

Nous avons lu et relu cet excellent livre, il nous apprend beaucoup sans fatigue, les faits y sont exposés avec tant de sobriété et de clarté qu'il semble que chaque phrase porte, que chaque mot était bien le mot indispensable et celui qui convenait, et nous engageons vivement nos lecteurs à se procurer ce nouvel ouvrage d'un auteur dont nous avions parlé avec grands éloges à propos de ses recherches sur le lait et les femelles laitières.

(*La Laiterie*, 3 décembre 1898).

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE. — Généralités.

DEUXIÈME PARTIE. — Principales opérations zootechniques.

(1 vol., p. 231, fig. 102)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Georges PELLISSIER

L'Éclairage à l'Acétylène

Tout le monde est intéressé à lire cet ouvrage, en premier lieu ceux qui s'occupent de la fabrication du carbure de calcium; ensuite, les ingénieurs, pour l'éclairage des phares, des voitures de chemin de fer. de tramways, etc., les architectes et propriétaires pour les installations privées, et les lampes portatives, les photographes pour les agrandissements et les projections, les médecins pour le laryngoscope éclairé à l'acétylène, les bicyclistes pour les lanternes, etc., enfin les municipalités, pour l'éclairage public.

L'ouvrage fort bien divisé comprend l'historique du nouveau gaz, l'examen des propriétés physiques et chimiques de l'acétylène, la description des fours électriques, de la fabrication et des propriétés du carbure de calcium, de la préparation de l'acétylène; l'étude et le classement des appareils générateurs, l'appréciation de l'acétylène liquéfié et comprimé, des observations sur la flamme de l'acétylène et le choix des becs, la comparaison du prix du nouvel éclairage avec les autres systèmes, les différentes applications déjà faites ou possibles et enfin des conseils sur les manipulations pratiques. — Il ne faudrait pas croire que l'auteur se borne à un exposé des systèmes qu'il décrit, il fait suivre chaque chapitre d'une synthèse dictée par une étude approfondie de la question, et par la volonté bien arrêtée de rester impartial, c'est ce qui fait le grand mérite de son travail.

(*Moniteur de l'Industrie*, 15 avril 1898).

Examinant les points d'intérêt général, les conditions à réaliser pour la préparation et l'utilisation rationnelles de l'*Acétylène,* l'auteur étudie les applications qui paraissent réellement pratiques, il fait bonne justice des utopies et des illusions que font résonner trop haut ceux qui ont intérêt à faire de la propagande; il ramène à ses justes limites le champ d'exploitation qui reste à explorer, et finalement signale avec juste raison les dangers qu'il y a lieu de craindre et les précautions qu'il faut prendre pour les éviter.

L'ouvrage impartialement et scientifiquement écrit est le meilleur que nous possédions sur cette matière.

(*Le Constructeur*, 28 mars 1897).

La partie qui traite des appareils générateurs chez M. Pellissier est très complète, et ce livre sera recherché par tous ceux qui s'occupent des applications de l'acétylène à l'éclairage.

(*L'Electrochimie*, mars 1897).

TABLE DES MATIÈRES

William RAMSAY
De la Société royale de Londres,
Correspondant de l'Institut de France.
Traduit de l'anglais par
Georges CHARPY
Docteur ès sciences.

(1 vol., 194 p., 6 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Les Gaz de l'Atmosphère

Le livre de William Ramsay est l'exposé de la genèse des découvertes suscitées par la recherche de la nature de l'air et des propriétés des gaz qui le constituent.

Les chapitres I et II sont consacrés aux tentatives de Boyle, de Mayow et de Hales que dominaient encore les théories de l'air considéré par les anciens comme un corps simple dont l'homogénéité pouvait, à la rigueur, subir l'influence d'effluves cosmiques. — A ce point du livre, nous sommes au milieu du dix-septième siècle. — Les recherches se succédaient empreintes des idées de la scolastique et dans l'ardeur des discussions théologiques lorsque survint Black qui, en découvrant l'acide carbonique, apporte à l'analyse la contribution du fait expérimental soutenu par des mesures quantitatives précises.

Ayant ainsi fait pressentir l'avènement des lois de combinaison, William Ramsay presse son étude et nous montre tour à tour Daniel Rutherford, Priestley et Scheele découvrant l'azote et l'oxygène, et enfin le couronnement de l'œuvre par la mémorable expérience de Lavoisier qui fit s'anéantir les théories du phlogistique.

Les chapitres V, VI, VII sont consacrés entièrement à la retentissante découverte de l'argon par l'auteur et son collaborateur lord Rayleigh. — A cet égard, l'homme de science et le praticien trouveront dans ce livre les matériaux disséminés partout ailleurs, sur lesquels s'édifia la découverte de l'argon et des propriétés qui caractérisent ce nouveau gaz. — De même, tous ceux que peuvent servir des connaissances simplement élémentaires de chimie rencontreront dans l'ouvrage de William Ramsay l'intérêt qui s'attache à l'étude d'un point si important de la science moderne.

(*Revue de Chimie analytique appliquée*, juin 1898).

La description des gaz de l'atmosphère et l'histoire de leur découverte ne pouvait guère être écrite par un homme plus au courant de la matière que le savant qui, pour son compte, a su mettre en évidence quatre de ces gaz.

Une seule chose était à craindre, c'était que trop plein de son sujet, l'auteur ne se tînt à des hauteurs auxquels le vulgaire eût été incapable de le suivre. Mais il est Anglais et, comme tant d'autres savants de cette nation, il a su, sans rien perdre de la rigueur scientifique, donner à son œuvre ce cachet pratique qui rend son livre accessible à tout homme intelligent. Seuls, les deux derniers chapitres pourront paraître un peu ardus aux lecteurs insuffisamment préparés. En revanche, les autres y verront deux bonnes leçons de philosophie chimique.

En résumé, l'ouvrage est de ceux que tous peuvent lire avec plaisir et avec profit.

(*Le Cosmos*, 6 août 1898).

On sait qu'il y a deux ans, au grand étonnement des chimistes, M. Ramsay prouva que nous ne connaissions pas encore la composition de l'air atmosphérique. Il venait, en effet, de découvrir un gaz inconnu jusqu'ici, l'argon. C'est l'historique de cette découverte qu'a présentée M. Ramsay au public anglais. Et M. Charpy a eu la bonne pensée de la rendre accessible au grand public français. Ce résumé aidera à faire apprécier l'importance des travaux de l'éminent physicien anglais et initiera nos jeunes physiciens de l'avenir à une des découvertes les plus étonnantes de la fin de notre siècle.

(*Journal des Débats*, 16 mai 1898).

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 225 p., 65 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

X. ROCQUES
Ingénieur-chimiste,
Ancien chimiste principal du Laboratoire municipal de Paris.

Les Eaux-de-vie et Liqueurs

Dans un premier chapitre, l'auteur étudie les matières premières de l'industrie des eaux-de-vie et liqueurs, c'est-à-dire les eaux-de-vie naturelles d'une part et, d'autre part, des alcools d'industrie ; puis, il compare ces deux classes d'alcools au point de vue de leur production, de leur qualité, etc. Les six chapitres suivants sont relatifs à l'étude des diverses eaux-de-vie : cognacs, marcs, eaux-de-vie de vin et de cidre, kirschs, rhum et whisky. L'auteur traite notamment avec détails la préparation des eaux-de-vie charentaises. Le chapitre VIII est relatif aux liqueurs en général, le chapitre IX aux liqueurs apéritives (absinthe, vermouth, bitter), le chapitre X aux fruits à l'eau-de-vie, le chapitre XI aux eaux aromatiques distillées, et le chapitre XII aux sirops. L'auteur termine cette partie par des considérations générales sur le commerce des liqueurs et sur les fraudes. Nous signalons tout spécialement les deux derniers chapitres du volume dans lesquels l'auteur, se plaçant à un point de vue très général, étudie les alcools dans leur rapport avec l'hygiène, la législation et le fisc. Ce livre sera lu avec grand intérêt non seulement par les spécialistes, mais aussi par toutes les personnes soucieuses de se former une opinion exacte sur une des questions qui, à l'heure actuelle, s'imposent à l'attention de tous.

(*Revue des Falsifications*, juin 1899).

TABLE DES MATIÈRES

l'ozone. — Vieillissement par le bois. — Futailles. — *Manipulations des eaux-de-vie :* Coupages. — Mouillage, sirupage, collage, filtration. — *Prix des eaux-de-vie :* Prix de revient. — Prix de vente. — *Eaux-de-vie de l'Armagnac :* Alambic du Gers. — *Eaux-de-vie de vin du Midi; trois-six de Montpellier :* Appareils continus. — Appareil continu Deroy. — Appareil continu Egrot. — Appareil à distillation continue et fractionnée. — *Distillation des vins altérés et malades. Eaux-de-vie de lies. Eaux-de-vie de marcs :* Traitement des marcs par lixiviation. — Traitement des marcs par les calandres. — *Eaux-de-vie de marcs de Bourgogne.*

CHAP. III. — EAUX-DE-VIE DE CIDRE ET DE POIRE.

CHAP. IV. — EAUX-DE-VIE DE FRUITS A NOYAUX. KIRSCH. QUETSCH : *Kirsch :* Titre en sucre des cerises. — Titre en acidité. — Kirsch de commerce. — Kirsch de fantaisie. — *Quetsch.*

CHAP. V. — RHUM ET TAFIA : *Fabrication du rhum :* Levain artificiel. — Fermentation continue.

CHAP. VI. — WHISKY : *Scotch whisky.* — *Irish whisky.* — *Whisky d'alambic.*

CHAP. VII. — EAUX-DE-VIE DE FANTAISIE.

CHAP. VIII. — LIQUEURS : *Liqueurs par distillation :* Préparation des alcoolats. — Alcoolats composés. — Fabrication des liqueurs. — Conservation des liqueurs. — *Liqueurs par les essences :* Tableau des essences extraites des plantes aromatiques. — *Liqueurs par infusion :* Préparation du cassis. — Infusion de cerises. — *Commerce des liqueurs.*

CHAP. IX. — LIQUEURS DITES APÉRITIVES : *Absinthe.* — *Bitters et amers.* — *Vermouth.*

CHAP. X. — LES FRUITS A L'EAU-DE-VIE : *Cerises.* — *Prunes.* — *Pêches.* — *Chinois.*

CHAP. XI. — EAUX AROMATIQUES DISTILLÉES : *Eau de fleur d'oranger.* — *Eau de roses.* — *Eau de framboises.*

CHAP. XII. — SIROPS : *Sirop de sucre :* Sirops glucosés. — Sirops de fruits. — Sirop d'orgeat. — Sirop de gomme. — Sirop de grenadine. — Altération des sirops.

CHAP. XIII. — COMMERCE DES SPIRITUEUX : Importation et exportation des spiritueux.

CHAP. XIV. — FRAUDES DES EAUX-DE-VIE ET LIQUEURS : Fraudes sur la nature des eaux-de-vie. — Fraudes sur le degré alcoolique. — Fraudes sur les liqueurs. — Fraudes sur les sirops. — Fraudes sur les eaux distillées.

CHAP. XV. — LES EAUX-DE-VIE ET LIQUEURS AU POINT DE VUE DE L'HYGIÈNE : Richesse alcoolique des boissons. — Classification des eaux-de-vie et liqueurs. — Action physiologique des eaux-de-vie et liqueurs. — Alcoolisme aigu et alcoolisme chronique.

CHAP. XVI. — L'ALCOOL AU POINT DE VUE LÉGISLATIF ET FISCAL : Revenus des impôts sur les boissons. — Le monopole de l'alcool. — Réformes législatives.

(1 vol., 300 p., 45 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

A. de SAPORTA

Physique et Chimie viticoles

EXTRAIT DE LA PRÉFACE

Dans cet ouvrage, l'auteur veut appuyer ses indications sur une base solide et débute par un *Exposé de quelques principes théoriques ;* il ne s'attarde pas sur les notions purement chimiques, et dès son premier chapitre, commence à entretenir son lecteur des ferments qui jouent un si grand rôle dans la production du vin.

Le deuxième chapitre est consacré aux analyses agricoles ; avec le troisième, *les vignobles et le sol*, il entre dans le vif de son sujet, il discute l'immunité contre le phylloxéra que procure à la vigne la plantation dans le sable ; puis l'abondance du calcaire, comme cause de la chlorose ; de l'étude des *sols*, l'auteur passe à celle des *engrais ;* il expose ensuite les notions de *météorologie*, qu'il juge utile de faire connaître.

Les remèdes : tel est le titre du sixième chapitre ; j'avoue que moi, homme du Nord, qui n'appartiens pas à la région de la vigne, je suis surpris que ce chapitre VI ne soit pas intitulé : *les maladies ;* mais M. de Saporta écrit à Montpellier ; il a eu depuis si longtemps les oreilles rabattues des ravages causés par ces maladies, il a une telle horreur des phrases toutes faites et des lamentations banales, qu'il ne s'est pas senti le courage de récrire un chapitre qui a été écrit déjà plusieurs milliers de fois ; donc il suppose les maladies connues et cherche à les combattre ; il appuie notamment sur cet emploi du sulfate de fer appliqué sur les plaies de la vigne après la taille imaginée par M. Rassiguier, qui est efficace, mais dont la théorie n'est pas donnée.

La vigne a triomphé de ses ennemis, elle a mûri ses raisins, il faut faire du vin, connaître la composition des raisins, savoir le degré d'acidité qu'ils présentent, enfin suivre la fermentation. Dans notre Midi, et encore plus en Algérie, le grand ennemi de la fermentation régulière est l'élévation de la température ; aussi M. de Saporta décrit-il avec grand soin les appareils réfrigérants qui maintiennent les moûts dans des conditions favorables au travail des levures. Il indique ensuite comment on détermine la richesse en alcool du vin produit et comment on empêche les fermentations secondaires qui se déclarent souvent dans les vins peu chargés d'alcool, comme ceux que fournissent les cépages à grand rendement, qui forment presque exclusivement les vignobles du Midi.

M. de Saporta termine son ouvrage par la phrase suivante, qui indique clairement pourquoi il l'a écrit : « Autant que possible nous avons cherché à simplifier et coordonner en sacrifiant les détails et nous croyons qu'en effet l'application intelligente d'un assez petit nombre de principes généraux peut suffire au propriétaire pour éviter bien des déboires ».

On ne saurait mieux dire. La production du vin, comme toutes les industries qui mettent en œuvre les ferments, est une observation délicate, qui cesse d'être avantageuse aussitôt qu'elle est mal conduite ; un vin mal préparé ne se conserve pas, et, comme l'écrit M. de Saporta, on n'évitera les déboires qu'en opérant régulièrement; on y réussira en prenant pour guide *la Physique et la Chimie viticoles.*

P.-P. DEHÉRAIN,
de l'Académie des sciences.

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 250 p., 70 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

P. TRUCHOT
Ingénieur-chimiste.

L'Éclairage à incandescence

par le gaz et les liquides gazéifiés

Rien n'avait été écrit jusqu'à ce jour relativement aux progrès réalisés durant ces dernières années par l'éclairage à incandescence. L'ouvrage de M. P. Truchot comble cette lacune en abordant la question au double point de vue théorique et pratique. Il est essentiel, en effet, de ne pas séparer l'interprétation des phénomènes de leurs applications, surtout lorsqu'il s'agit de faits récents qui, dans l'espèce, sont les industries nées de l'exploitation des terres rares. La vive concurrence suscitée par l'apparition des procédés d'éclairage intensifs : Électricité, Manchons à base d'oxydes rares, Acétylène, place cet ouvrage au premier rang des actualités de la Science appliquée. — L'industriel, le technicien et, en général, tous ceux dont les travaux apportent une contribution nouvelle aux perfectionnements de l'éclairage moderne, trouveront dans ce livre les documents les plus précieux, comme on peut s'en rendre compte en parcourant la table des matières ci-dessous résumée.

On sait que la question de l'éclairage a pris un essor considérable depuis quelques années ; aussi le volume de M. Truchot peut-il rendre service à beaucoup de personnes en mettant sous les yeux une foule de renseignements qui sont généralement disséminés dans des publications spéciales.

(Journal des Usines à gaz).

TABLE DES MATIÈRES

— Procédés anciens Frankeinstein, Robert Werner, Galafer et Villy, Lumière Drummond, Chalumeaux, Becs, Sellon, Clamond. — Procédés modernes : — Auer Von Welsbach, Otto-Fehnenjeblm, Ludwig Haitinger, Barrière.

Chap. III. — **Minéraux employés dans la fabrication des manchons incandescents** : Cérite. — Gadolinite. — Thorite. — Monazite et sables monazités. — Xénotime. — Zircon.

Chap. IV. — Les corps incandescents : 1° Corps incandescents à base de métaux et d'alliages métalliques. 2° Corps incandescents à base d'oxydes réfractaires. — 1re classe : Corps incandescents obtenus par moulage. — 2e classe : Corps incandescents obtenus par imprégnation de tissus de fibres organiques. — 3e classe : Corps incandescents obtenus par filage. — Pouvoir éclairant des manchons incandescents. — Coloration de la lumière émise par les manchons.

Chap. V. — Description des divers bruleurs modernes a incandescence. — Incandescence par le gaz de houille, le gaz d'eau, etc. — Description et propriétés d'un brûleur Bunsen. — Bunsen Lecomte. — Brûleurs et becs ordinaires. — 1re classe : Brûleurs utilisant le bec rond. — 2e classe : Brûleurs utilisant le bec papillon. — 3e classe : Becs intensifs. — Théorie des becs intensifs. — Brûleurs Bandsept. — Bunsen à gaz chaud Bandsept. — Brûleurs Denayrouse. — Brûleur Lecomte. — Brûleur Saint-Paul. — Éclairage à incandescence par le gaz.

Chap. VI. — Régulateurs de pression. — Rhéomètres. — Manomètres.

Chap. VII. — Allumage des becs a incandescence.

Chap. VIII. — Incandescence par le pétrole et l'essence de pétrole.

Chap. IX. — Incandescence par l'alcool et par l'acétylène.

Chap. X. — Applications de l'éclairage a incandescence par le gaz et les liquides gazéifiés.

Chap. XI. — Considérations économiques.

Chap. XII. — Brevets français concernant l'éclairage a incandescence par le gaz et les liquides gazéifiés.

(1 vol., 315 p., 6 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

P. TRUCHOT
Ingénieur chimiste.

Les Terres rares

Minéralogie, Propriétés, Analyse

Cet ouvrage fixe le détail des connaissances physiques et chimiques que l'on possède actuellement sur les métaux des terres rares. Leurs applications à l'éclairage et le grand nombre de documents qu'elles fournissent à l'analyse en font un sujet d'une puissante actualité scientifique.

En résumé, cet ouvrage est utile aux chimistes et à tous ceux qu'intéressent les découvertes récentes et les travaux remarquables de MM. Delafontaine, Etard, Lebeau, Langfeld, Moissan, Urbain, etc., sur ce point de la chimie moderne où se spécialisent chaque jour de nouvelles et fécondes industries.

« Voici un livre qui paraît à son heure et qui sera lu certainement avec un vif intérêt par toutes les personnes qui suivent attentivement les progrès de l'éclairage à incandescence, et qui désirent se rendre compte des avantages qu'on peut en retirer. Il n'existait encore en France ni à l'étranger, aucun ouvrage complet écrit sur cette matière dont l'actualité, pourtant si manifeste, mérite d'exciter sérieusement l'activité des inventeurs et des praticiens. Les seuls renseignements qu'on possédait étaient épars dans des mémoires lus devant des Sociétés techniques, ou dans des articles de journaux et — disons-le — surtout des journaux allemands ou anglais. Nous constatons avec satisfaction que le premier livre écrit sur l'incandescence et les terres rares qui en sont la base est l'œuvre d'un Français qui a su, dans ce domaine spécial, se faire une notoriété inconstestable. »

(*Le Gaz*, 15 mai 1899).

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE. — **Minéralogie.**

DEUXIÈME PARTIE. — **Chimie générale.**

III. — MÉTAUX TRIATOMIQUES : Groupe cérique. — *Cérium :* Historique. — Etat naturel. — Sels céreux. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels cériques. — Sels céreux à radicaux organiques. — *Lanthane :* Historique. — Etat naturel. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Didyme* (ancien) : Historique. — Néodyme. — Praséodyme. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Samarium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Decipium :* Historique. — Etat naturel. — *Gadolinium :* Historique. — Etat naturel. — Groupe Yttrique. — *Yttrium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Terbium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — *Erbium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés.—Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Ytterbium :* Historique. — Etat naturel. — *Scandium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Thulium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — *Holmium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — *Dysprosium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — *Philippium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux oxygénés. — *Métal* Σ : Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — *Lucium :* Historique. Etat naturel. — Propriétés.

IV. — MÉTAUX TÉTRATOMIQUES : *Zirconium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Thorium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques. — *Germanium :* Historique. — Etat naturel. — Propriétés. — Sels à radicaux halogénés. — Sels à radicaux oxygénés. — Sels à radicaux organiques.

TROISIÈME PARTIE. — **Analyse.**

I. — ANALYSE SPECTRALE. MODE OPÉRATOIRE : Spectres d'étincelle et spectres d'absorption. — Observation et identification des spectres. — Bibliographie spectroscopique. — Longueurs d'onde des raies du spectre solaire. — *Spectres d'étincelle :* 1° *Groupe thorique :* Thorium. — Zirconium. — 2° *Groupe cérique :* Cérium. — Lanthane. — Dydime. — Samarium. — 3° *Groupe yttrique :* Yttrium. — Erbium. — Ytterbium. — Thulium. — Scandium. — Gadolinium. — Spectres d'absorption. — Didyme (ancien). — Néodyme. — Praséodyme. — Samarium. — Erbium. — Holmium. — Dysprosium. — Thulium.

II. — MÉTHODE DE FRACTIONNEMENT DES TERRES RARES. — GÉNÉRALITÉS : Traitement de la cérite. — Procédé Marignac. — Procédé Mosander. — Procédé Debray. — Procédé Auer von Welsbach. — Procédé Schultzenberger. — Procédé de Wyronboff et Verneuil. — Procédés Berzélius, Bunsen, Czudnowicz. — Procédés Mosander, Brauner, Popp. — *Traitement de la gadolinite :* Procédé Auer von Welsbach. — *Traitement de l'orthite :* Procédé Bettendorff. — *Traitement des sables monazités :* Procédé Schutzenberger et Bondouard. — Méthode Drossbach. — Procédé Dennis et Chamot. — Méthode Lecoq de Boisbaudran. — Bibliographie des méthodes de fonctionnement.

III. — RÉACTION CARACTÉRISTIQUE DES SELS : Glucinium. — Zirconium. — Thorium. — Germanium. — Cérium. — Lanthane. — Didyme. — Scandium. — Yttrium.

IV. — Dosage et séparation du glucinium. — Dosage et séparation du zirconium. — Dosage et séparation du thorium. — Dosage et séparation du germanium. — Dosage et séparation du cérium. — Dosage et séparation du lanthane. — Dosage et séparation du didyme. — Dosage et séparation de l'yttrium.

V. — ANALYSES SPÉCIALES : Analyse des sables monazités. — Analyse des nitrates de thorium commerciaux. — Méthode Drossbach. — Méthode de l'oxyde de thorium, dans les sables monazités. — Méthode Dennis. — Méthode Glasser.

Dr **Georges TREILLE**
Ancien professeur d'hygiène navale et de pathologie exotique aux Écoles de plein exercice de la Marine,
Inspecteur général en retraite du Service de Santé des colonies.

Principes d'Hygiène coloniale

EXTRAIT DE LA PRÉFACE

En écrivant les *Principes d'hygiène coloniale*, l'auteur a eu surtout en vue de tracer les règles générales qui paraissent les plus propres à faciliter aux Européens leur établissement dans les pays chauds.

Ce livre s'adresse donc plus particulièrement à ceux qui veulent connaître les conditions physiques de cet établissement et par là se faire une opinion qui leur serve de guide dans l'appréciation des entreprises coloniales auxquelles ils désirent se livrer.

Mais il s'adresse encore à ceux qui, sans participer personnellement à ces entreprises, entendent exercer leurs droits de citoyens à l'égard de la chose publique, et en s'inspirant de l'intérêt national, peser de leur influence sur la direction des affaires coloniales. Car l'expansion de l'Europe dans les pays tropicaux, à laquelle la France a pris une part si étendue, impose à chacun de nous des devoirs nouveaux à remplir.

Chacun, en effet, pour une part quelconque et si minime soit-elle, est intéressé aujourd'hui à suivre, à contrôler la politique coloniale, et doit puiser les principes directeurs de son jugement à toutes les sources utiles.

Encore que l'Hygiène ait, dans ces dernières années, conquis une large influence dans la sociologie européenne en raison des services qu'elle a rendus et qu'elle est appelée à rendre de plus en plus à la masse des populations, il ne serait pas tout à fait exact de mesurer à ce progrès la part d'influence qui doit revenir à l'Hygiène tropicale dans la sociologie coloniale.

Ici, le rôle de l'Hygiène, — Science générale, Science de tous, — doit être mis en place éminente, car, sans elle, rien de durable ne peut être fondé dans les colonies.

Sans l'Hygiène pratiquée dans la vie privée comme dans l'adminis-

tration publique, étendue aux personnes comme aux choses dans tout ce qui concerne l'individu aussi bien que le groupement collectif, nulle sécurité sous les tropiques.

La santé de l'Européen dans ces régions est exposée à tant d'aléas, que la sûreté des capitaux engagés dans les entreprises dont il a la charge en est elle-même incertaine. Qu'un chef de maison de commerce, qu'un chef d'exploitation agricole, entre les mains desquels reposent des intérêts primordiaux, vienne à tomber gravement malade ou à disparaître brusquement, ce peut être la ruine; c'est, à coup sûr, un trouble sérieux dans la marche des affaires. Il faut donc que l'Européen qui se fixe dans les pays chauds s'instruise des risques qu'il est exposé à y courir, et qu'en toute connaissance de leurs causes il s'entoure des moyens les plus propres à s'en garantir.

Le personnel que nos colonies tropicales attendent, — le personnel vivifiant par excellence, — c'est le négociant, l'industriel, l'agriculteur. Mais à quelque point de vue qu'on se place, l'établissement de l'Européen aux pays chauds, surtout dans le territoire de l'Afrique intertropicale, ne peut avoir des chances de succès que dans des conditions déterminées.

Ce livre a précisément pour but l'étude de ces conditions. Je me suis inspiré, pour le faire, d'abord d'une expérience personnelle déjà longue et que j'ai acquise en visitant les colonies d'Asie, d'Afrique et d'Amérique à diverses époques de ma carrière; et aussi de l'enseignement de la pathologie et de l'hygiène tropicales que j'ai pratiqué comme professeur aux anciennes écoles de plein exercice de la marine.

TABLE DES MATIÈRES

(1 vol., 272 p., 45 fig.)
Cartonnage toile anglaise.
PRIX : **5** francs.

Commandant VALLIER

L'Artillerie

Matériel — Organisation

France, Allemagne, Angleterre, Autriche-Hongrie, Italie, Espagne, Russie, Turquie, États-Unis, Japon, etc.

Le livre du commandant Vallier est la mise au point documentée et précise de l'état actuel de l'Artillerie des puissances européennes. Les États-Unis et le Japon figurent également dans cette étude, tant à cause des événements militaires récents qui ont révélé les armements de ces puissances, que du rôle actif qu'elles se préparent à jouer dans les règlements qui sont à l'ordre du jour des chancelleries. La partie principale du volume est entièrement consacrée à l'examen critique de l'Artillerie des diverses puissances, que renforcent de nombreux tableaux comparatifs. Les figures, toutes inédites, mettent sous les yeux du lecteur des documents entièrement nouveaux. Ce livre n'est pas un inventaire des progrès de l'Artillerie, ce n'est pas davantage une thèse sur ce qu'elle devrait être ; — c'est exactement un état de ce qu'elle est. A ce titre, il s'adresse à tous ceux qui s'intéressent aux graves questions de la défense nationale. Le texte, que n'encombre pas une terminologie fatigante, est d'une lecture aisée pour tous, et nous croyons que nulle part encore on a présenté sous une forme aussi attachante une question d'un intérêt général aussi puissant.

(*Revue du Cercle militaire*, janvier 1899).

L'auteur consacre un quart environ du volume à des généralités sur la bouche à feu, la poudre, le projectile, l'affût. Cela fait, il traite en détail de l'organisation actuelle, au point de vue tant du personnel que du matériel, de l'Artillerie de chacune des puissances : France, Allemagne, Angleterre, Autriche-Hongrie, Italie, Russie, Belgique, Danemark, Suède et Norvège, Espagne, Hollande, Portugal, Suisse, Bulgarie, Roumanie, Serbie, Grèce, Turquie, États-Unis, Japon.

Bien que le livre ne renferme aucune indiscrétion sur les mystérieux canons en cours de fabrication de divers côtés, il peut être considéré comme un inventaire de l'état des artilleries à la fin du XIXe siècle.

TABLE DES MATIÈRES

IV. — Les usines françaises : Forges et chantiers de la Méditerranée. — Usines du Creusot (Schneider et Cie). — Société Nordenfelt. — Etablissements Hotchkiss : canons-revolvers, canons à tir rapide Hotchkiss.

Allemagne. — I. Généralités. — II. Troupes : Recrutement des officiers. — Régiments. — Artillerie à pied. — III. Matériel : 1. Matériel de campagne. — 2. Matériel léger de siège : canon de 12 centimètres, obusier de 15 centimètres, mortier de 21 centimètres. — 3. Matériel de place. — 4. Artillerie de côte et de bord. — IV. Usine Krupp : Artillerie Krupp C/80. — Artillerie C/87, C/88, C/89. — Artillerie à tir rapide de campagne. — Tableaux relatifs au matériel Krupp. — Canon de 75 millimètres L 28 C/95 (Krupp) : 1° le coin ; 2° la plaque d'appui ; 3° la vis de fermeture ; 4° la manivelle avec clavette et goupille ; 5° l'éjecteur ; 6° le percuteur avec son ressort. Affût. — Munitions.

Angleterre. — I. Généralités. — II. Troupes. — III. Matériel : Matériel de campagne. — Construction du matériel. — IV. Usines anglaises : Etablissements Armstrong. — Etablissements Maxim Nordenfelt à Erith : canon à tir rapide de 75 millimètres, Mitrailleuses Maxim.

Autriche-Hongrie. — I. Organisation : Etablissements. — II. Troupes : Artillerie de campagne. — Artillerie de forteresse. — Artillerie technique. — III. Matériel : Matériel de campagne. — Matériel de siège. — Matériel de place. — Matériel de côte et de bord.

Italie. — I. Organisation générale et services techniques : Services centraux. — Commandements de l'artillerie. — Etablissements d'instruction : corps d'instruction, académie militaire, école d'application de l'artillerie et du génie, école des sous-officiers. — Etablissements de construction : employés de l'artillerie, gardes d'artillerie, chefs techniques de l'artillerie et du génie, compagnies d'ouvriers, compagnies d'artificiers, compagnies d'armuriers. — II. Troupes : Artillerie de campagne. — Artillerie de forteresse. — III. Matériel : Matériel de campagne. — Matériel de siège, de place et de côte. — Matériel de bord.

Russie. — I. Organisation générale et services techniques : Grand-maître de l'artillerie. — Direction générale de l'artillerie au Ministère de la guerre. — Comité de l'artillerie. — Directions d'artillerie des circonscriptions. — Ecoles d'officiers : école d'artillerie Michel et Constantin, académie d'artillerie Michel. — Etablissements de l'artillerie : établissements de construction, dépôts d'artillerie. — II. Troupes : Artillerie de campagne : Troupes de réserve. — Artillerie de forteresse. — III. Matériel : Mode de construction. — Matériel de campagne actuel : nouvel affût de campagne, nouvel affût à bêche de crosse. — Matériel de siège et de place. — Matériel de côte et de bord.

Belgique. — I. Organisation : Établissements. — Écoles. — II. Troupes. — III. Matériel.

États scandinaves : *Danemark*. — I. Organisation et troupes : État-major. — Artillerie technique. — Ecoles. — Artillerie de campagne. — Artillerie de forteresse. — II. Matériel.

Suède et Norvège. — I. Organisation et troupes. — II. Matériel.

Espagne. — I. Organisation : Service de l'artillerie dans les places. — II. Troupes. — III. Matériel.

Hollande.

Portugal. — I. Organisation. — II. Troupes. — III. Matériel.

Suisse. — I. Organisation : Commandements de l'artillerie. — Etablissements. — Officiers. — II. Troupes. — III. Matériel.

Puissance des Balkans : *Bulgarie. — Roumanie. — Serbie.*

Royaume de Grèce.

Turquie. — I. Organisation : Grande maîtrise de l'artillerie. — II. Troupes. — III. Matériel.

États-Unis. — I. Services techniques. — II. Troupes. — III. Matériel : Canons pneumatiques.

Japon. — Organisation et matériel.

Tableaux numériques.

TABLE ALPHABÉTIQUE

Paris. — Imp. E. CAPIOMONT et Cie, rue de Seine, 57.